

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS
PESADOS

TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JONNATHAN RODRIGO MORALES COROZO
TUTOR: ING. JORGE ALBERTO MEDINA CRIOLLO

QUITO

2014

APROBACIÓN DEL TUTOR

Como tutor de la tesis de grado **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS**, que la misma es original y ha sido desarrollada por el señor **JONNATHAN RODRIGO MORALES COROZO** bajo mi dirección y conforme a todas las observaciones realizadas considero que el trabajo reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito a los 17 días del mes de Enero de 2014.



Ing. J. A. Medina C.

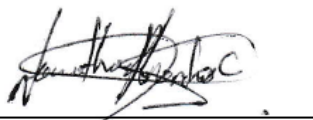
PROFESOR TUTOR

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, **JONNATHAN RODRIGO MORALES COROZO**, en calidad de autor tesis de grado realizada sobre el **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS**, por la presente autorizo a la **UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR** hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Quito, 17 de Enero de 2014



J. R. Morales C.

172275140-9

Jonnathan-morales@hotmail.com

DEDICATORIA

A la combinación perfecta de espacio tiempo en la que cada una de las personas importantes en mi vida llegaron y partieron.

AGRADECIMIENTOS.

A mi familia, mi madre Genoveva Corozo y hermanos importantes en mi desarrollo personal.

A la Facultad de Ingeniería Química, de cuyos profesores, amigos y compañeros me llevo gratos recuerdos.

A mi tutor de tesis por su colaboración en el presente trabajo y la amistad mostrada este último año.

A la empresa QUIMIPAC por la gran colaboración brindada a lo largo de la ejecución de este trabajo.

A la empresa Repsol por la facilitación de recursos para la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICOS	XI
LISTA DE ANEXOS	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN.	1
1. CRUDOS PESADOS.....	3
1.1. Clasificación del petróleo.....	3
1.1.1. <i>Densidad API</i>	3
1.1.2. <i>Factor Kuop</i>	3
1.1.3. <i>Contenido de Azufre</i>	4
1.2. <i>Origen del petróleo pesado</i>	5
2. EMULSIONES	6
2.1. Clasificación de las emulsiones.....	6
2.1.1. <i>Naturaleza de la fase externa</i>	6
2.1.2. <i>Tamaño de las gotas de la fase interna</i>	6
2.2. Propiedades físicas de las emulsiones.....	6
2.2.1. <i>Propiedades superficiales</i>	6
2.2.2. <i>Propiedades reológicas</i>	7
2.2.2.1. Comportamiento viscoso.....	7
2.2.2.2. Comportamiento plástico.....	8
2.3. Agente emulsionantes.....	10
3. REOMETRÍA	11
3.1. Reómetros capilares.....	11
3.2. Reómetros extensionales.....	11
3.3. Reómetros rotatorios.....	11
3.3.1. <i>Reómetros rotacionales de cilindros concéntricos</i>	12

4. PARTE EXPERIMENTAL.....	13
4.1. Diseño experimental.....	13
5. DATOS EXPERIMENTALES.	18
5.1. Características del agua tipo 1.....	18
5.2. Caracterización básica del crudo	18
5.2.1. <i>Densidad API observado a 60°F.</i>	18
5.2.2. <i>BSW observado.</i>	18
5.2.3. <i>Viscosidad cinemática a 40°C</i>	19
5.2.4. <i>Contenido de azufre.</i>	19
5.3. Análisis reológico.....	19
6. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	42
6.1. Determinación de la viscosidad cinemática a 40°C.....	42
6.1.1. <i>Cálculo de la viscosidad Cinemática en los bulbos C y J para el crudo 1.</i>	42
6.1.2. <i>Cálculo de la densidad Relativa, para el Crudo 1.</i>	43
6.2. Determinación del corte de agua.	44
6.2.1. <i>Modelos reologicos para distintas concentraciones de agua a 30°C.</i>	44
6.3. Reogramas de las emulsiones preparadas con el agente emulsionante.	45
6.3.1. <i>Determinación concentración óptima de agente emulsionante.</i>	48
7. DISCUSIÓN	54
8. CONCLUSIONES	56
9. RECOMENDACIONES.....	57
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación según la densidad API.....	3
Tabla 2. Clasificación según factor KUOP.....	4
Tabla 3. Clasificación según contenido de azufre.....	4
Tabla 5. Características del agua tipo 1.....	20
Tabla 6. Densidades API observadas a 60°F (ASTM D-5002).....	20
Tabla 7. Porcentaje de BSW determinado.....	21
Tabla 8. Constantes para el cálculo de la viscosidad cinemática.....	21
Tabla 9. Contenido de azufre.....	21
Tabla 10. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 a 30°C y 35°C	22
Tabla 11. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 a 40°C y 45°C	24
Tabla 12. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 a 50°C	26
Tabla 13. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 10% y 15% de agua a 30°C.....	28
Tabla 14. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 20% y 25% de agua a 30°C.....	30
Tabla 15. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C.....	32
Tabla 16. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 25°C y 30°C.....	34
Tabla 17. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 35°C y 40°C.....	36
Tabla 18. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 45°C y 50°C.....	38

Tabla 19. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 10% y 15% de agua a 30°C.....	40
Tabla 20. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 17,5% y 20% de agua a 30°C	42
Tabla 21. Constantes C y J para los viscosímetros utilizados.....	44
Tabla 22. Resumen de la caracterización básica de los crudos empleados.....	45
Tabla 23. Datos de la variación de la viscosidad aparente con la temperatura para los crudos analizados	45
Tabla 24. Modelos reologicos para el crudo 1 a diferentes concentraciones de agua, a 30°C.....	46
Tabla 25. Modelos reologicos para el crudo 2 a diferentes concentraciones de agua, a 30°C.....	46
Tabla 26. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad	48
Tabla 27. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente Emulsionante 2 a distintos gradientes de velocidad.....	49
Tabla 28. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad.....	50
Tabla 29. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 2 a distintos gradientes de velocidad.....	51
Tabla 30. Concentración optima de agente emulsionante.....	52
Tabla 31. Viscosidad aparente en función de la temperatura, para el crudo 1 con los dos emulsionantes probados.....	52
Tabla 32. Viscosidad aparente en función de la temperatura, para el crudo 2 con los dos emulsionantes probados.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento y modelos reológicos de fluidos no newtonianos.....	10
Gráfico 2. Esquema experimental de la caracterización de crudos pesados.....	14
Gráfico 3. Esquema experimental de la Reología de las emulsiones de crudo 1.....	15
Gráfico 4. Esquema experimental de la Reología de las emulsiones de crudo 1.....	16
Gráfico 5. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C.....	23
Gráfico 6. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 35°C.....	23
Gráfico 7. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 40°C.....	25
Gráfico 8. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 45°C.....	25
Gráfico 9. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 50°C.....	27
Gráfico 10. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 10% de agua	29
Gráfico 11. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 15% de agua.....	29
Gráfico 12. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 20% de agua.....	31
Gráfico 13. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 25% de agua.....	31
Gráfico 14. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 30% de agua.....	33
Gráfico 15. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 25°C.....	35

Gráfico 16. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C.....	35
Gráfico 17. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 35°C.....	37
Gráfico 18. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 40°C.....	37
Gráfico 19. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 45°C.....	39
Gráfico 20. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 50°C.....	39
Gráfico 21. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C con 10% de agua.....	41
Gráfico 22. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo1 a 30°C con 15% de agua.....	41
Gráfico 23. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo1 a 30°C con 17,5% de agua.....	43
Gráfico 24. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo2 a 30°C con 20% de agua.....	43

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Reómetro PHYSICA MCR-301.....	66
ANEXO B. Equipo de determinación de densidad API, norma ASTM D-5002.....	67
ANEXO C. Reogramas de las emulsiones preparadas con los distintos aditivos.....	68

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS

RESUMEN

Comportamiento reológico de dos emulsiones acuosas de crudos pesados de los campos Conaco (crudo 1) y Bloque 16 (crudo 2) con concentraciones de agua en volumen, utilizando dos aditivos reológicos.

Los crudos fueron caracterizados mediante normas ASTM. Con la ayuda del reómetro se determinó el comportamiento de emulsiones crudo/agua en 10, 15, 20, 25 y 30% de agua, a 30 °C. Con el porcentaje de agua en el que hay un cambio de comportamiento reológico se prepararon emulsiones a las que se añade el aditivo en concentraciones que van desde 0,2 al 1% en volumen.

Los resultados se muestran en reogramas donde se observa la variación de la viscosidad y el esfuerzo en función de la velocidad de deformación.

De los resultados, se concluye que las emulsiones se ajustan a los modelos reológicos de Ostwald y Carreau y la concentración de los dos aditivos oscila entre 0,25 al 0,65% en volumen, referida a la emulsión total.

PALABRAS CLAVES: PETRÓLEO CRUDO PESADO/ EMULSIONES ACUOSAS/ REOLOGÍA/ ADITIVOS REOLÓGICOS/ MODELOS MATEMÁTICOS.

RHEOLOGICAL STUDY OF HEAVY CRUDE EMULSION

ABSTRACT.

Rheological behavior of two aqueous emulsions of heavy oil Conaco (crude 1) and block 16 field (oil 2) with water at volume concentrations, using two rheological additives. Oils were characterized by ASTM standards. With the aid of the rheometer behavior oil / water emulsions at 10, 15, 20, 25 and 30% water was determined at 30 ° C. With the percentage of water in which there is a change in rheological behavior emulsions which additives, in concentrations ranging from 0.2 to 1% by volume were added were prepared.

The results are shown in rheograms where the change in viscosity and the stress versus the strain rate is observed.

From the results, it is concluded that emulsions to Ostwald Rheological and Carreau models and the concentration of the two additives ranging from 0.25 to 0.65% by volume, based on the total emulsion is adjusted.

KEYWORDS: HEAVY CRUDE OIL / AQUEOUS EMULSION / RHEOLOGY / RHEOLOGICAL ADDITIVES / MATHEMATICAL MODELS.

INTRODUCCIÓN.

A medida que se avanza en el estudio de técnicas de extracción de crudos, se hace más rentable la extracción de yacimientos de crudos de baja densidad API y de alta viscosidad, conocidos como crudos pesados y extra pesados cuya densidad está por debajo de los 20°API, que constituían un gran desafío para los consorcios que se interesaban en yacimientos con petróleos de estas características, en especial la viscosidad que constituye una propiedad fisicoquímica que afecta de forma significativa en el transporte de esta materia prima desde los campos productores hacia las plantas de refinación, en el caso de Ecuador se lo hace por medio del OCP que brinda servicio de transporte de crudos entre 24° y 18°API, la dificultad radica que mientras la viscosidad sea más alta se incrementan también los costos asociados al transporte, por lo que se recurre a diferentes métodos para modificar su comportamiento reológico, entre ellos se puede mencionar los siguientes: por calentamiento, por dilución, flujo anular, utilización de CO₂, mejoradores de flujo y mediante la preparación de emulsiones en agua.

Se han realizado otros estudios relacionados a este, acerca de las condiciones de estabilidad de emulsiones directas de crudos pesados. En el que se estudió un crudo de 16,627 Pa.s a 30°C. [1], observándose que a gradientes de velocidad mayores de 50 s⁻¹ la viscosidad se mantiene constante. Referente a las variables que afectan la reología de las emulsiones crudo/agua, se realizó un estudio en el que se determinó como afecta el contenido de sales [2] expresado como NaCl en el comportamiento reológico de estas, en las que la tensión superficial tiene una relación inversa con la salinidad. También se ha investigado como las variables físicas afectan el comportamiento reológico [3] de las emulsiones crudo/agua, entre las que están la presión y la naturaleza del pre tratamiento del crudo utilizado.

Si se considera el valor de la viscosidad del agua que es notablemente menor que la del petróleo pesado, la viscosidad de la emulsión acuosa reduciría significativamente, para este fin se estima que la concentración del agua no debería superar el 30% en volumen y obtener viscosidades que faciliten el bombeo del nuevo sistema.

La investigación consistió en preparar emulsiones con diferente corte de agua y se determinó el comportamiento reológico de estas por medio de un reómetro rotacional PHYSICA MRC301 a

30°C, en base a este estudio se determinó el contenido óptimo de agua para cada crudo, estando entre 17 y 30% en volumen, con esta información se realizó la evaluación de la concentración de dos aditivos reológicos proporcionados por ECUAEMULSIONES, obteniéndose concentraciones óptimas entre 0,2 y 0,6 % en volumen referida a la emulsión total.

Se observó que la viscosidad de las emulsiones estudiadas corresponden a las viscosidades que tendrían los crudos utilizados a temperaturas mayores de 50°C, y tienen un comportamiento Pseudo-plásticos al igual que el crudo sin formar emulsiones, correspondiéndose dicho comportamiento a tres modelos reológicos que son los siguientes: Carreau, Phillips-Deustch y Ostwald.

Comparando entre los dos aditivos se determinó que el aditivo 2 trabaja a menores concentraciones a temperatura constante y forma emulsiones de mayor estabilidad.

1. CRUDOS PESADOS.

El petróleo constituye una mezcla de multicomponentes [4] formados por enlaces covalentes entre átomos de carbono- hidrogeno, se encuentran también otros compuestos formados con metales, azufre, entre otras sustancias que lo acompañan en la formación.

1.1. Clasificación del petróleo.

Debido a la variada composición que presenta esta sustancia que varía en cada uno de los campos de explotación e incluso entre los pozos dentro de un mismo campo, han surgido diferentes formas de clasificarlos bajo algunos criterios que pretenden de alguna manera dar una idea básica de su composición. La de uso más común es de acuerdo a su densidad [5] como se muestra en la tabla 1.

1.1.1. Densidad API. [6]

Tabla 1. Clasificación según la densidad API

Tipo de petróleo	Densidad, API
Extrapesado	<10
Pesado	10 a 20
Mediano	20 a 30
Liviano	>30

1.1.2. Factor Kuop. Es un método de naturaleza empírica propuesto por Watson, esta clasificación nos da una idea básica de la naturaleza química del crudo analizado. Para la determinación del factor de correlación o factor Kuop para crudos y fracciones de crudos se utiliza un concepto equivalente al punto de ebullición dado que no constituyen componentes puros, este concepto equivalente es el MeABP [7]*mean average boiling points*, el factor Kuop se estima con la siguiente relación:

$$Kuop = \frac{(MeABP)^{\frac{1}{3}}}{\rho_{r60^{\circ}F}}$$

Dónde:

$\rho_{r60^{\circ}F}$, es la densidad relativa del crudo o su fracción a 60°F.

En función a este factor tenemos la clasificación que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación según factor Kuop

Tipo de petróleo	factor Kuop
Parafínico	13
Mixto	12
Nafténico	11
Aromático	10

Fuente: **LLUCH ÚRPI, José.** *Tecnología y Margen del Refino del Petróleo*. Madrid : Diaz Santos S.A., 2008. p. 16 [7]

1.1.3. Contenido de Azufre, se los clasifica de acuerdo al porcentaje de azufre contenido en el crudo, como se muestra en la tabla 3

Tabla 3. Clasificación según contenido de azufre

Tipo de petróleo	%S
Dulce	<0,5
Medio	0,5-1
Agrio	>1

Fuente: barriosjunior0000, Clasificación de los petróleos crudos, 4 de Agosto de 2011, [en línea], [Fecha consulta: 2 de Abril de 2013]. Disponible en:

<<http://es.scribd.com/doc/61623844/Clasificacion-de-los-petroleos-crudos>>.

En el presente trabajo se utilizan petróleos comprendidos entre 10 y 20 °API, que son crudos pesados según la clasificación vista previamente. Los crudos estudiados pertenecen a diferentes campos petroleros del Ecuador.

1.2. Origen del petróleo pesado.

Los yacimientos de petróleos pesados por lo general son yacimientos jóvenes geológicamente hablando corresponden a los periodos comprendidos entre el Pleistoceno y el Mioceno [8], por tal motivo son yacimientos someros.

Al ubicarse superficialmente luego de su formación, el crudo, va perdiendo componentes livianos con el pasar del tiempo, lo que ocasiona que su densidad aumente durante este proceso. Esta degradación ocurrió durante la migración del crudo desde la roca generadora a la roca porosa donde finalmente se entrapa, y se debe a cambios físicos y químicos e incluso biológicos [9], cuando las bacterias presentes en el fluido metabolizan moléculas livianas para transformarlos en componentes más pesados.

2. EMULSIONES

Las emulsiones son sistemas coloidales [10] formados por la dispersión de gotas de un líquido o cristal líquido en el seno de otro líquido en el cual el primero es parcial o totalmente inmiscible en el segundo. La primera fase se conoce como fase dispersa o interna y la segunda como fase dispersante, continúa o externa [11], hay que tener en cuenta que cada una de las fases posee diferente solubilidad, la fase soluble en agua se conoce como fase hidrófila y la otra fase no soluble en agua se la conoce como fase lipófila o hidrófoba.

2.1. Clasificación de las emulsiones.

Básicamente las emulsiones se pueden clasificar bajo algunos criterios, entre los cuales los más importantes son los siguientes: la naturaleza de la fase externa y el tamaño de las gotas de la fase dispersa.

2.1.1. Naturaleza de la fase externa. De acuerdo a la naturaleza de la fase externa tenemos dos tipos de emulsiones, las emulsiones directas en las cuales la fase externa es hidrófila y las emulsiones inversas en las cuales la fase externa es lipófila.

2.1.2. Tamaño de las gotas de la fase interna. Tomando en cuenta este aspecto tenemos dos tipos de emulsiones las macro emulsiones con diámetros de gotas comprendidos entre 1 y 10 μm y las Nano o mini emulsiones comprendidas en diámetros de gota de fase interna menores a 1 μm [12] Como se verá más adelante el tamaño de gota de la fase interna y la distribución media de estas en el seno de la fase externa tiene influencia directa en la estabilidad de la emulsión. Entre menor sea el tamaño de la gota de la fase interna menor será la viscosidad de la mezcla para la misma concentración de fase interna.

2.2. Propiedades físicas de las emulsiones.

2.2.1. Propiedades superficiales. Tanto en la formación como en la evolución de la emulsión se dan cambios importantes de la superficie interfacial en la misma, se debe ejercer un trabajo sobre estos sistemas termodinámicamente inestables [13] para su formación, este trabajo conlleva a un incremento de la superficie interfacial, es decir a medida que se ejerce trabajo

sobre la emulsión el diámetro medio de las gotas de la fase dispersa decrece, por el método inverso la emulsión se desestabiliza hasta llegar a un nivel más bajo de energía (la separación de las Fases). En este desarrollo juega un papel importante la tensión superficial de las dos fases de la dispersión.

Energía libre de superficie. Se la define como la cantidad de energía disponible para crear una unidad de superficie en condiciones de vacío [14], que está relacionada con las fuerzas de adhesión de la sustancia

2.2.2. Propiedades reológicas. Las emulsiones son sistemas coloidales físicamente inestables, esta inestabilidad provoca que las emulsiones evolucionen y mediante coalescencia y decantación lleguen a un estado más bajo de energía, lo que ocasiona que sus propiedades también evolucionen, dicha evolución está íntimamente ligada a los cambios de las propiedades mecánico-estructurales del sistema.

La reología es la ciencia que estudia la deformación o el flujo de la materia sometida a un esfuerzo [15], pertenece a una de las ramas de la física denominada como mecánica de medios continuos, en donde se entiende como medio continuo al conjunto infinito de partículas que va a ser analizado macroscópicamente, por lo tanto se asume que toda discontinuidad microscópica es inexistente.

La reología se encarga del estudio de dos casos del comportamiento mecánico, que son el comportamiento viscoso y la plasticidad, incluyendo también algunos casos particulares de algunos materiales que tienen un comportamiento visco-elástico [16], a continuación se definen estos comportamientos:

2.2.2.1. Comportamiento viscoso. Se caracteriza por la proporcionalidad de las tensiones y de la velocidad de deformación [17], consiste en un modelo matemático lineal conocido como ley de Newton de la viscosidad en donde aparece un término de proporcionalidad conocido como viscosidad dinámica.

A continuación se describe la ecuación de Newton:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$$

Dónde:

τ_{xy} , Esfuerzo cortante en la dirección x.

μ , Viscosidad dinámica.

$\frac{du}{dy}$, Velocidad de deformación o velocidad de cizallamiento.

2.2.2.2. Comportamiento plástico. Este es un comportamiento no lineal de la relación entre la tensión y la deformación del fluido.

Existen una serie de fluidos que no se rigen a la ley de viscosidad de Newton, conocidos como fluidos no newtonianos, es decir el valor de su viscosidad no permanece constante con la variación de la velocidad de cizallamiento o el esfuerzo cortante aplicado sobre el fluido.

Existen distintos modelos matemáticos para definir sustancias no-newtonianas, que se pueden agrupar con la siguiente ecuación.

$$\tau_{ij} = -pI + 2\mu(D, \tau)D$$

Dónde:

τ_{ij} , Esfuerzo cortante en la dirección i.

μ , Viscosidad dinámica.

D, función del esfuerzo cortante.

pI, función de la viscosidad newtoniana a altos gradientes de velocidad.

Entre algunas de modelos matemáticos que definen a los fluidos no newtonianos según el modelo anterior, se tiene los siguientes:

Ostwald, $\mu(D) = \mu_0 |D|^{n-1}$

Carreau $\mu(D) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)(1 + \alpha |D|^a)^{\frac{n-1}{a}}$

Eyring $\mu(D) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \frac{\text{arcsenh}(\alpha |D|)}{\alpha |D|}$

Cross	$\mu(D) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \alpha D ^a}$
Sisko	$\mu(D) = \mu_{\infty} + \alpha D ^{n-1}$
Phillips Deutsch	$\mu(D) = \mu_{\infty} + \frac{1 + bD^2}{1 + cD^2}$

Dónde:

α , b y c, son variables características de la materia analizada.

El siguiente gráfico se puede apreciar como varía el esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidad o velocidad de cizallamiento, en la gráfica se observa que modelo matemático se ajusta mejor a cada comportamiento no newtoniano, sea dilatante o Pseudo-plásticos, se dividen dichos modelos en modelos de dos y tres variables respectivamente, y se incluye también modelos que son una extensión de la teoría cinético molecular de los gases y líquidos como es el caso del modelo de Eyring, el modelo de Ostwald que se le conoce como ley de la potencia expresa el comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos tanto Pseudo-plásticos como Dilatantes, esto depende del valor que tenga el coeficiente n, si este es igual a uno el fluido es newtoniano, si es menor a uno es pseudo plástico, caso contrario se trataría de un fluido dilatante.

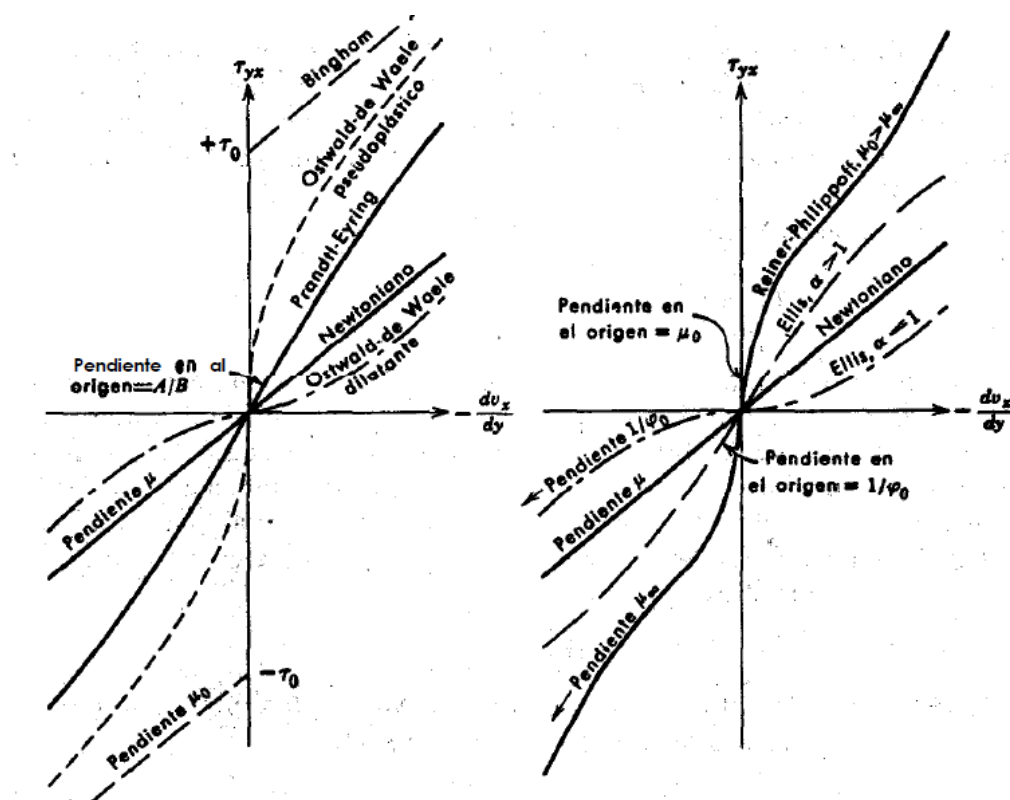


Gráfico 1. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento, y modelos reológicos de fluidos no newtonianos [18].

2.3. Agente emulsionantes.

Son sustancias de carácter anfifílicas, que forman una capa entre la parte lipofílica e lipofóbica de las emulsiones, la formación de esta capa permite que exista una mayor estabilidad en la emulsión desarrollada, principalmente modifica la tensión superficial entre la superficie en los dos líquidos que formaran la emulsión.

Cuando la sustancia anfifílica actúa directamente sobre la tensión superficial de la emulsión se lo conoce como tensoactivo.

Existen diversos tipos de sustancias surfactantes o tensoactivos estas son.

Hidrofílicos, u mayor afinidad es por las sustancias polares como el agua, **lipofílica**, sustancias con afinidad por los líquidos de carácter apolar; **catiónica**, Surfactantes cuya parte activa de superficie lleva una carga positiva; **Iónicos**, surfactante cuya parte activa lleva una carga negativa.

3. REOMETRÍA

La reometría es la medida de las propiedades reológicas de los fluidos, mediante el uso de reómetros. Los reómetros se pueden clasificar en tres grupos que se detallan a continuación:

3.1. Reómetros capilares.

Dado que en este equipo solo se puede determinar la viscosidad dinámica de la muestra de los denomina viscosímetros, el líquido fluye a través de un tubo delgado, se considera que la velocidad del fluido es máxima en el centro del capilar y tiende a la de las paredes del capilar a medida que se aleja del centro del fluido. La ecuación para este viscosímetro es la de Hagen-Poiseuille.

3.2. Reómetros extensionales.

Este tipo de equipos son de mayor sensibilidad a los cambios de la estructura de las moléculas del fluido durante los análisis, además de que permiten modelizar de manera exacta procesos como hilado, termo conformado espumación y soplado, como ejemplo.

3.3. Reómetros rotatorios.

Se caracteriza por tener dos partes de las cuales una es móvil, dichas partes están separadas por el espacio que ocupara el fluido durante el análisis, las partes tienen diferentes geometrías que se utilizan de acuerdo al estado de agregación en el que se encuentre la sustancia a analizar. Las geometrías más utilizadas son:

- Cilindros concéntricos
- Placas paralelas
- Cono-placa

Los reómetros rotacionales determinan las diferentes propiedades haciendo rotar el elemento móvil a una velocidad determinada y determinando el par de fuerzas que se provoca o viceversa. Los primeros se basan en el flujo de Couette. En estos el espacio anular debe ser mínimo para

que la velocidad de deformación sea constante.

3.3.1. Reómetros rotacionales de cilindros concéntricos. Son los más utilizados en la actualidad, teniendo en cuenta que los equipos actuales poseen partes intercambiables que permiten en una sola base poseer las geometrías más utilizadas de reómetros rotacionales. Y su conectividad a computadoras donde se procesa la información de manera ágil.

En el caso de los cilindros concéntricos (25) la viscosidad y el esfuerzo cortante se determinan de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$$

Dónde:

R_c = Radio del contenedor de la muestra.

R_b = Radio del cuerpo de giro.

Ω , $2\pi/60N$, N es la velocidad de giro (rpm).

M , par de fuerzas por unidad de longitud de cilindro sumergido.

X , distancia donde se determina la velocidad de cizalla.

4. PARTE EXPERIMENTAL.

4.1. Diseño experimental.

Se siguió en siguiente diseño experimental para la realización del presente trabajo.

4.1.1. Esquema de la caracterización de crudos pesados.

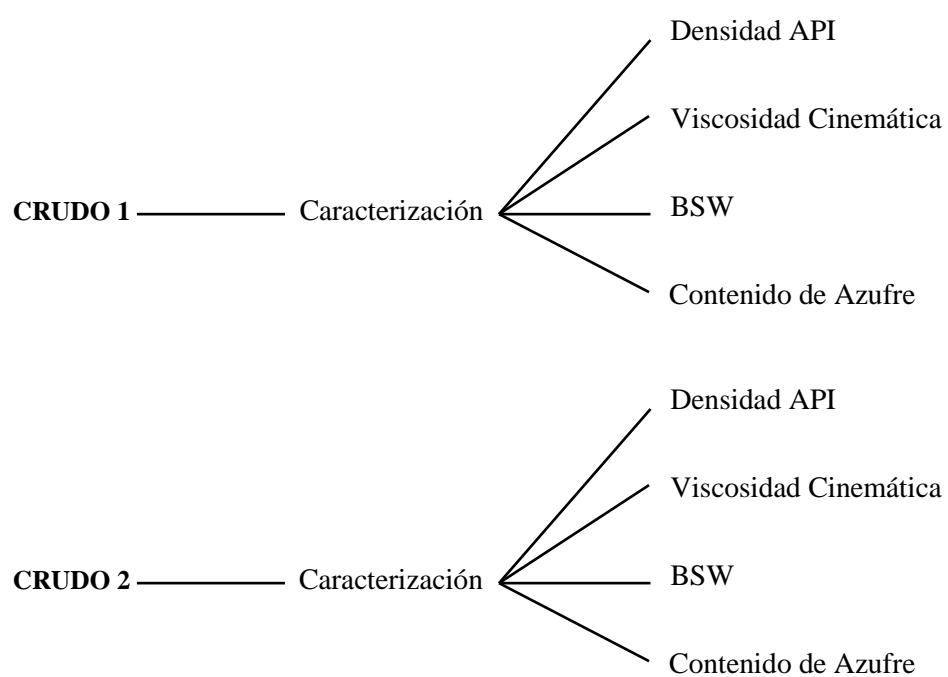


Gráfico 2. Esquema experimental de la caracterización de crudos pesados.

4.1.2. Esquema del análisis reológico de los crudos pesados

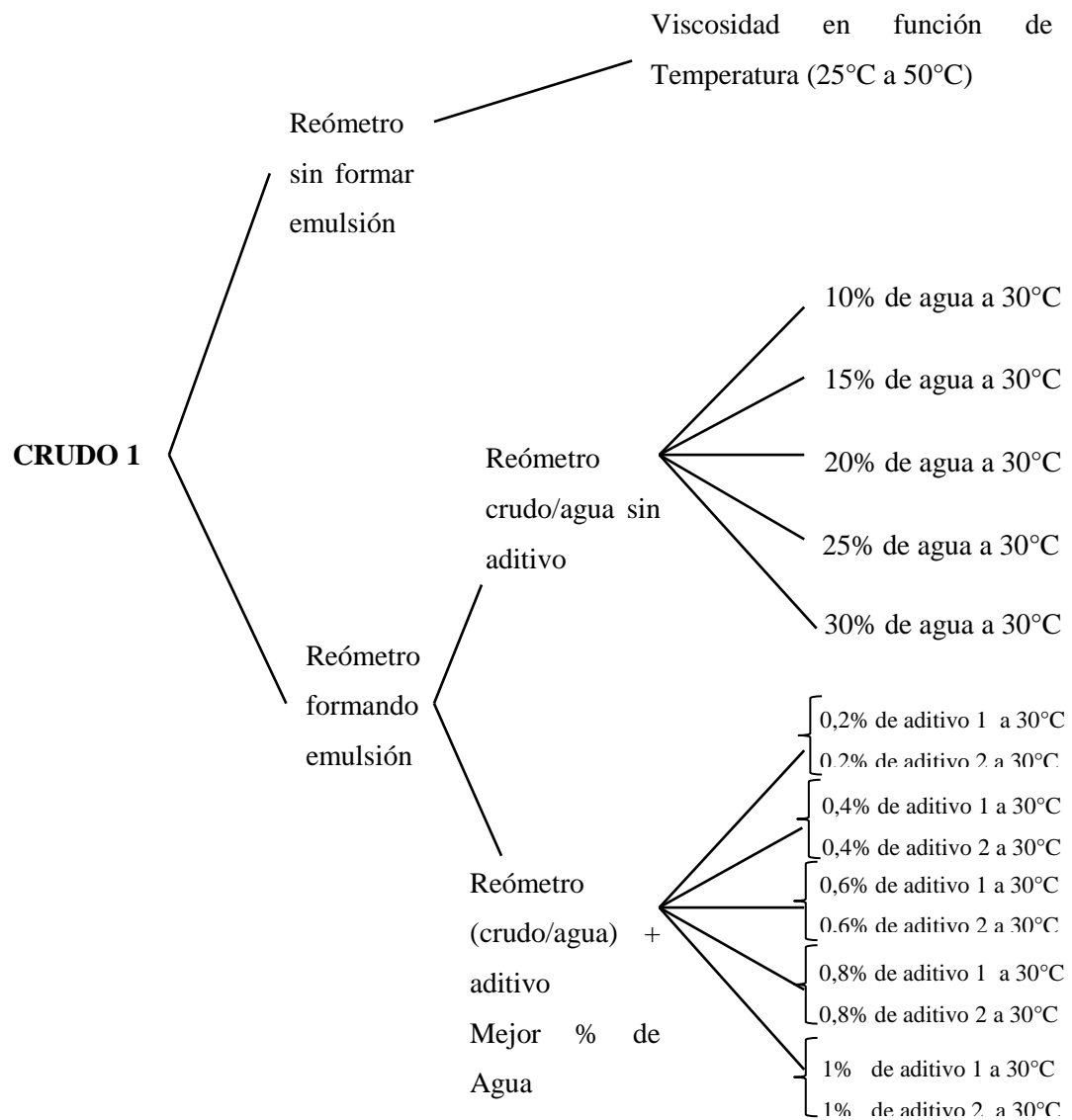


Gráfico 3. Esquema experimental de la reología de las emulsiones de crudos pesados

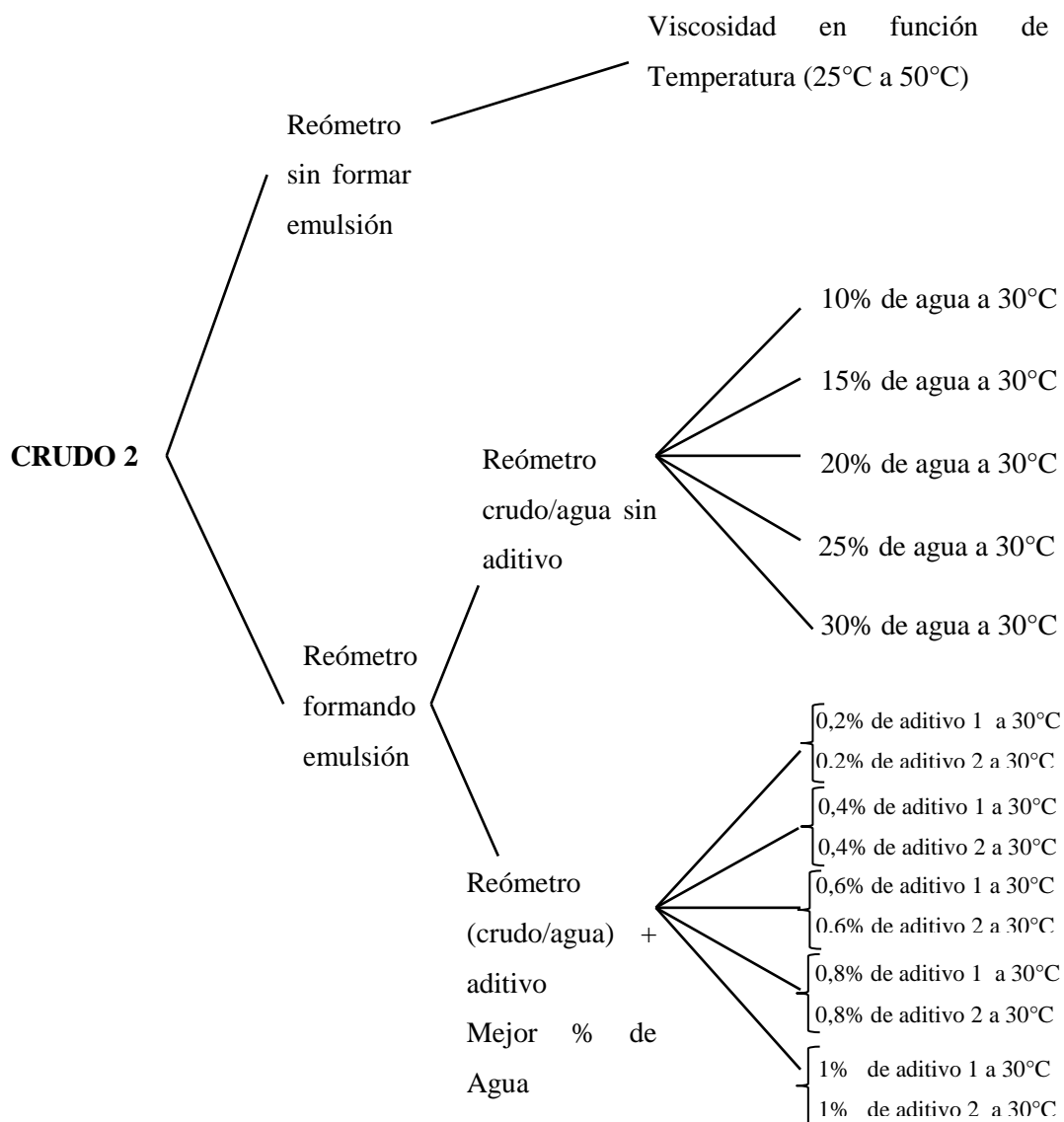


Gráfico 4. Esquema experimental de la reología de las emulsiones de crudo 1.

4.2. Caracterización del crudo pesado.

El crudo pesado cuya procedencia se indica en el capítulo 1, se caracterizó mediante la utilización de normas ASTM dentro del Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación de la Universidad Central del Ecuador y el laboratorio de crudo del NPF en el bloque 16 (Repsol).

Para la caracterización del crudo se siguió los siguientes procedimientos ASTM (*American Society of Testing and Materials*)

-AGUA Y SEDIMENTOS (BSW),	ASTM D-96
-DENSIDAD API,	ASTM D-5002
-VISCOSIDAD CINEMÁTICA,	ASTM D-445
-CONTENIDO DE AZUFRE,	ASTM D-4294

4.3. Análisis reológico.

Para el análisis reológico de los crudos y las emulsiones se realizó el siguiente procedimiento, en el reómetro PHYSICAL MCR 301 de marca ANTON PAAR.

4.3.1. Sustancias.

- Crudos Analizados:
 - Crudo Bloque 16, (Crudo 1)
 - Crudo Conaco, (Crudo 2)
- Agua Tipo 1.
- Emulsionantes.

4.3.2. Materiales y equipos

- Vasos de precipitación de 500 y 100ml
- Reverbero eléctrico
- Agitador
- Pipetas de 1ml
- Reómetro Physical MRC 301
- Densímetro DM40/Dx40 para análisis ASTM D-5002
- Equipos para la determinación de los análisis ASTM D-96, ASTM D-445 y ASTM D-4294,

3.3.3. Método para el análisis reológico.

3.3.3.1. Preparación y análisis del crudo.

- Calentar el crudo a 40°C, con un baño de María, separando el agua libre previamente.
- Homogenizar la muestra, agitando durante 5 minutos.

- Colocar la muestra en el equipo y esperar llegar a la temperatura a la que se va a realizar el ensayo, realizar los análisis.

3.3.3.2. Preparación de emulsiones.

- Preparar emulsiones de crudo/agua con 10, 15, 20, 25 y 30% de agua, y analizar su comportamiento a 30°C.
- Determinar según su comportamiento reológico el corte de agua en el que hay un cambio de comportamiento reológico.
- Preparar emulsiones con el corte de agua determinado y concentraciones de agente emulsionante desde 0,2 a 1 respectivamente.

3.3.3.3. Reómetro y software.

- Escoger el tipo de porta muestra o copa y rotor apropiado al tipo de muestra que se va a realizar.
- Se escoge en función de la viscosidad de la muestra, en este caso se escoge la copa y el rotor cilíndrico.
- Encender el compresor, teniendo en cuenta drenar el agua que se encuentre en los filtros de aire.
- Encender el sistema de refrigeración.
- Encender el Ordenador, para inicializar el sistema.
- Encender el equipo *RHEOPLUS PHYSICA* MRC 301, una vez que se haya alcanzado 2,7 bares de presión en el compresor, retirar la cubierta protectora del reómetro.
- Inicializar el equipo desde la computadora, introducir el rotor (*TOOL MASTER*), y esperar a que el equipo lo reconozca, el *tool-master* en este caso el C-27.
- Realizar la prueba de Inercia del *tool-master* y a encerrarla.
- Colocar el valor de temperatura a la que se va a realizar el ensayo, colocar la muestra en la copa, bajar el *tool-master*, teniendo en cuenta que la muestra no se desborde de la copa.
- En la segunda pantalla escoger el tipo de análisis a realizar, seguir los pasos que solicita el software, e iniciar el ensayo.
- Terminado el ensayo, escoger el tipo de cálculo que se desea realizar con los datos obtenidos, y escoger el modelo reológico que se ajusta de mejor manera.

5. DATOS EXPERIMENTALES.

5.1. Características del agua tipo 1.

Tabla 5. Características del agua tipo 1.

Variable Fisicoquímica	Valor	Unidades
Conductividad eléctrica, Valor Máximo a 25°C	0,056	μS/cm2
Resistividad minima a 25°C	18	MΩ
Carbono organico total, Valor máximo	50	μg/l
Sodio valor máximo	1	
Cloruros valor máximo	1	
Silice valor máximo	3	

FUENTE: AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, ASTM D-1193-99. Standard Specification for Reagent Water,. 1997.

5.2. Caracterización básica del crudo

5.2.1. Densidad API observado a 60°F.

Tabla 6. Densidades API observadas a 60°F (ASTM D-5002)

Muestra	API a 60°F
Crudo 1	17,1
Crudo 2	11,8

5.2.2. BSW observado.

Tabla 7. Porcentaje de BSW determinado.

Muestra	%BSW
Crudo 1	0,3
Crudo 2	40

5.2.3. Viscosidad cinemática a 40°C

Tabla 8. Contantes para el cálculo de la viscosidad cinemática.

Muestra	Viscosímetro	Tiempo a 40°C,s	
		Valor C	Valor J
Crudo 1	500Z906	537	775
Crudo 2	400E756	245	349

5.2.4. Contenido de azufre.

Tabla 9. Contenido de azufre.

Muestra	%Azufre
Crudo 1	1.9122
Crudo 2	1.5263

5.3. Análisis reológico.

Se muestran los resultados obtenidos en el Reómetro PHYSICAL MRC 301.

**Tabla 10. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el Crudo 1 a 30°C
35°C**

Pts,	Gradiente de velocidad	Speed	30°C			35°C		
			Viscosidad	Esfuerzo	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa·s]	[Pa]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	5,38	0,0537	2,86	0,0317	3,17	1,69
2	0,0147	0,0114	5,36	0,0786	4,18	0,0475	3,23	2,52
3	0,0215	0,0167	5,32	0,115	6,09	0,0707	3,28	3,75
4	0,0316	0,0245	5,28	0,167	8,87	0,105	3,3	5,55
5	0,0464	0,036	5,24	0,243	12,9	0,154	3,32	8,18
6	0,0681	0,0529	5,2	0,354	18,8	0,226	3,32	12
7	0,1	0,0776	5,15	0,515	27,3	0,33	3,3	17,6
8	0,147	0,114	5,1	0,748	39,7	0,482	3,28	25,6
9	0,215	0,167	5,04	1,09	57,7	0,703	3,26	37,4
10	0,316	0,245	4,98	1,58	83,7	1,02	3,24	54,4
11	0,464	0,36	4,97	2,31	122	1,48	3,19	78,7
12	0,681	0,529	4,93	3,36	179	2,16	3,17	115
13	1	0,776	4,88	4,88	259	3,12	3,12	166
14	1,47	1,14	4,83	7,1	377	4,54	3,09	241
15	2,15	1,67	4,82	10,4	551	6,65	3,09	353
16	3,16	2,45	4,79	15,2	805	9,69	3,07	515
17	4,64	3,6	4,75	22	1,170	14,1	3,05	751
18	6,81	5,29	4,7	32	1,700	20,5	3,01	1,090
19	10	7,76	4,67	46,7	2,480	30	3	1,590
20	14,7	11,4	4,59	67,4	3,580	43,7	2,98	2,320
21	21,5	16,7	4,53	97,6	5,190	63,5	2,95	3,370
22	31,6	24,5	4,45	141	7,480	92,2	2,92	4,900
23	46,4	36	4,37	203	10,800	133	2,87	7,090
24	68,1	52,9	4,26	290	15,400	192	2,82	10,200
25	100	77,6	4,13	413	21,900	275	2,75	14,600

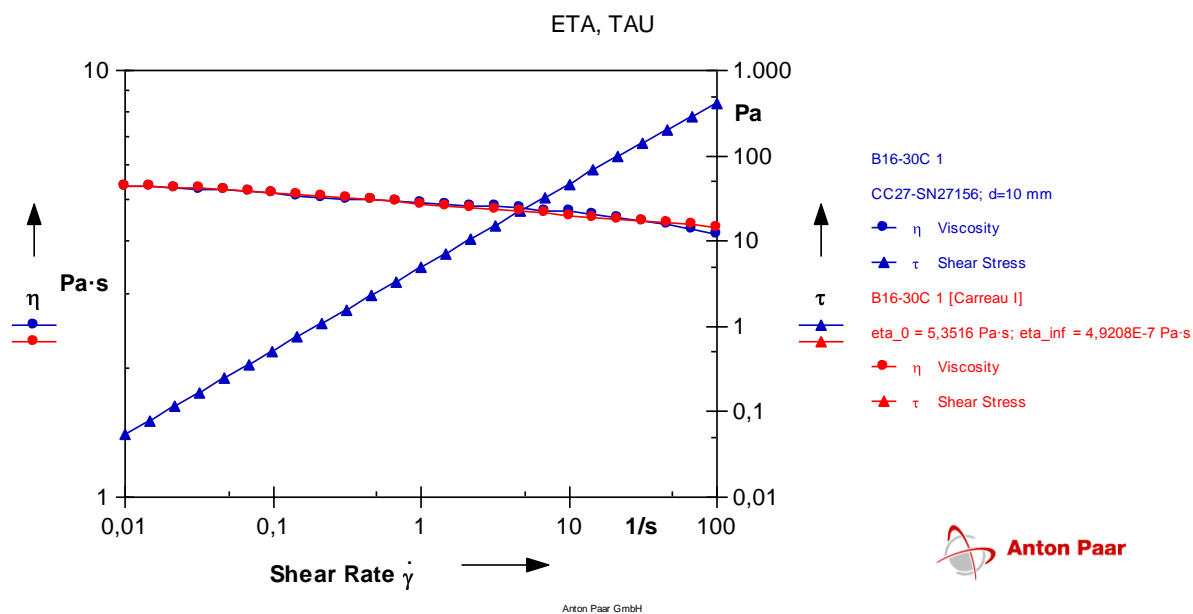


Gráfico 5. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C.

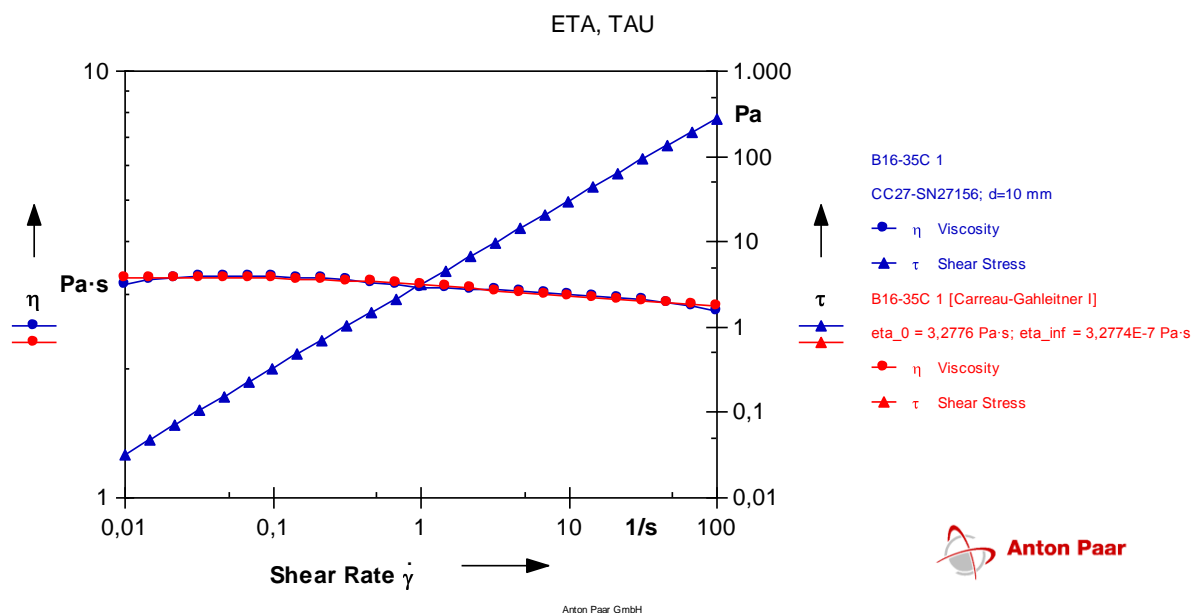


Gráfico 6. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 35°C.

Tabla 11. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el Crudo 1 a 40°C y 45°C

Pts,	Gradiente de velocidad	Speed	40°C			45°C		
			Esfuerzo	viscosidad	Torque	Esfuerzo	viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	0,0262	2,63	1,39	0,0182	1,82	0,969
2	0,0147	0,0114	0,0357	2,43	1,9	0,0245	1,67	1,3
3	0,0215	0,0167	0,0499	2,32	2,65	0,0338	1,57	1,8
4	0,0316	0,0245	0,0705	2,23	3,75	0,0476	1,5	2,53
5	0,0464	0,036	0,1	2,16	5,33	0,0679	1,46	3,61
6	0,0681	0,0529	0,143	2,09	7,58	0,0974	1,43	5,17
7	0,1	0,0776	0,205	2,05	10,9	0,14	1,4	7,42
8	0,147	0,114	0,297	2,02	15,8	0,202	1,37	10,7
9	0,215	0,167	0,432	2,01	23	0,294	1,36	15,6
10	0,316	0,245	0,634	2,01	33,7	0,431	1,36	22,9
11	0,464	0,36	0,926	1,99	49,2	0,625	1,35	33,2
12	0,681	0,529	1,35	1,98	71,6	0,909	1,33	48,3
13	1	0,776	1,97	1,97	105	1,33	1,33	70,4
14	1,47	1,14	2,88	1,96	153	1,93	1,32	103
15	2,15	1,67	4,18	1,94	222	2,83	1,31	150
16	3,16	2,45	6,14	1,94	326	4,12	1,3	219
17	4,64	3,6	8,93	1,92	474	6,03	1,3	321
18	6,81	5,29	13,1	1,92	695	8,81	1,29	468
19	10	7,76	19,1	1,91	1,010	12,9	1,29	683
20	14,7	11,4	27,9	1,9	1,480	18,8	1,28	997
21	21,5	16,7	40,7	1,89	2,160	27,4	1,27	1,460
22	31,6	24,5	59,4	1,88	3,160	40	1,26	2,120
23	46,4	36	86,4	1,86	4,590	58,3	1,26	3,100
24	68,1	52,9	125	1,84	6,660	85	1,25	4,510
25	100	77,6	181	1,81	9,620	123	1,23	6,550

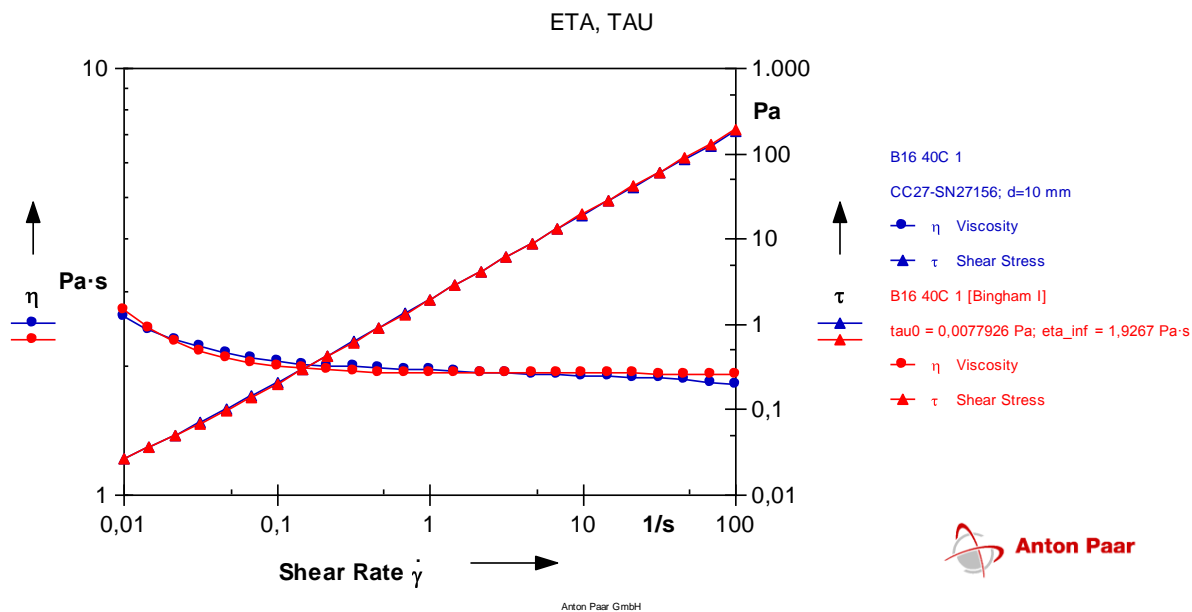


Gráfico 7. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 40°C.

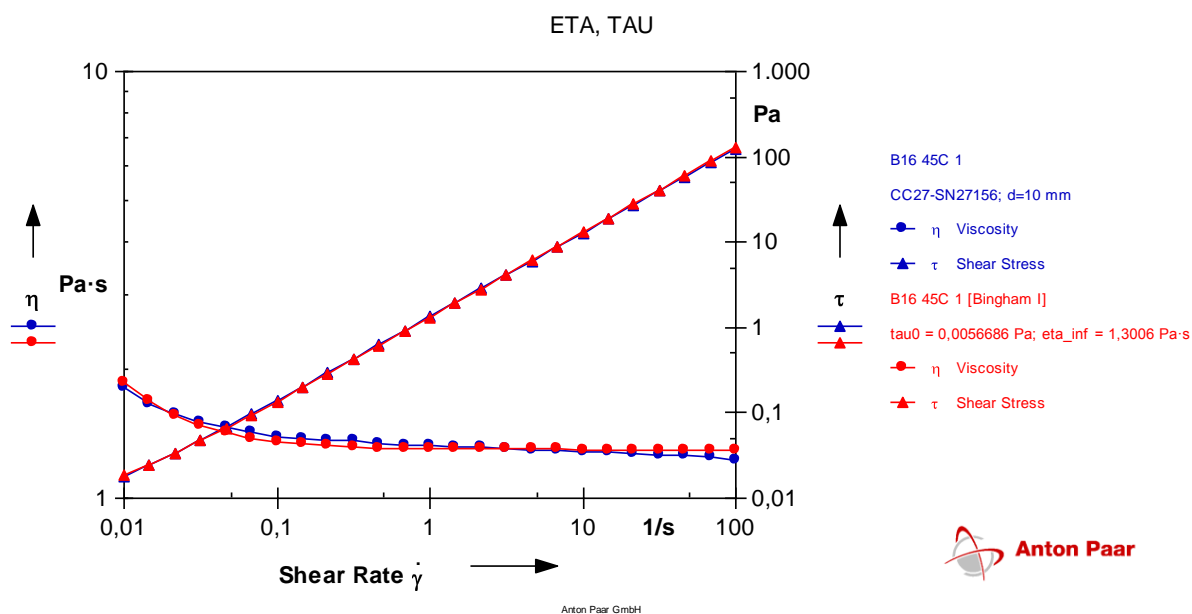


Gráfico 8. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 45°C.

Tabla 12. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 a 50°C

Pts,	gradiente de velocidad	Speed	50°C		
			esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	0,00516	0,517	0,274
2	0,0147	0,0114	0,00956	0,651	0,508
3	0,0215	0,0167	0,0166	0,771	0,883
4	0,0316	0,0245	0,0268	0,846	1,42
5	0,0464	0,036	0,0418	0,901	2,22
6	0,0681	0,0529	0,0636	0,933	3,38
7	0,1	0,0776	0,0952	0,952	5,06
8	0,147	0,114	0,141	0,959	7,48
9	0,215	0,167	0,205	0,953	10,9
10	0,316	0,245	0,296	0,936	15,7
11	0,464	0,36	0,43	0,926	22,8
12	0,681	0,529	0,629	0,923	33,4
13	1	0,776	0,908	0,908	48,3
14	1,47	1,14	1,33	0,907	70,7
15	2,15	1,67	1,94	0,901	103
16	3,16	2,45	2,84	0,898	151
17	4,64	3,6	4,15	0,893	220
18	6,81	5,29	6,04	0,887	321
19	10	7,76	8,84	0,884	470
20	14,7	11,4	12,9	0,879	685
21	21,5	16,7	18,8	0,874	1,000
22	31,6	24,5	27,5	0,871	1,460
23	46,4	36	40,2	0,866	2,140
24	68,1	52,9	58,7	0,862	3,120
25	100	77,6	85,6	0,856	4,550

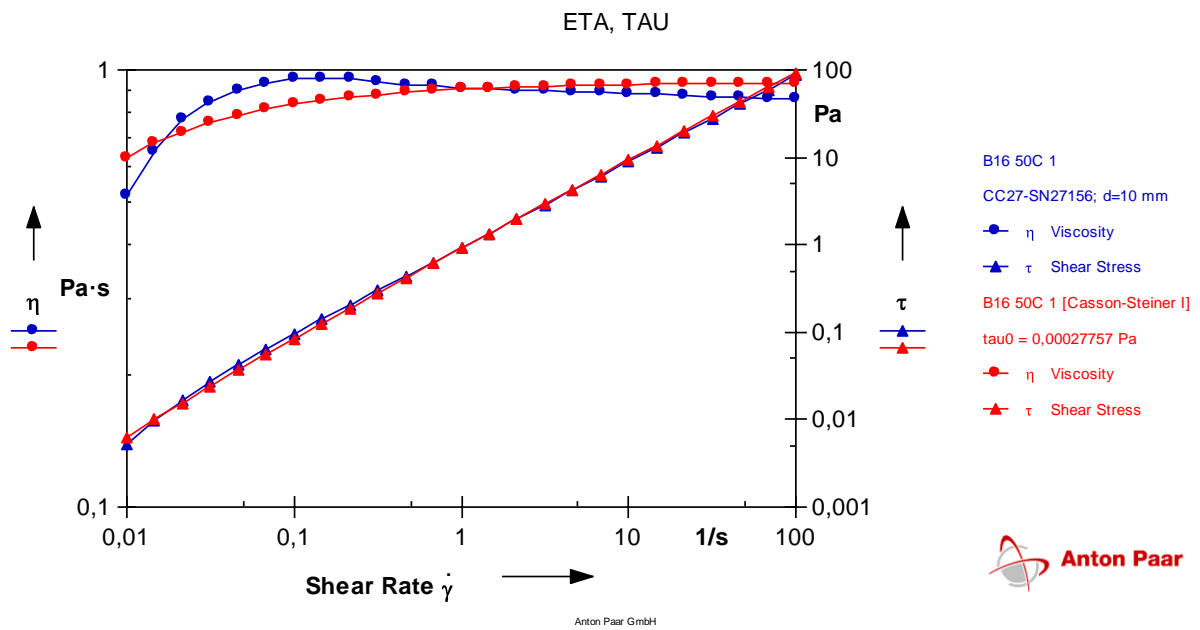


Gráfico 9. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 50°C.

Tabla 13. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 10% y 15% de agua a 30°C

Pts.	Gradiente de velocidad	Speed	10%			15%		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0.0999	0.0776	0.778	7.78	41.3	0.536	5.36	28.5
2	0.126	0.0977	0.997	7.92	53	0.686	5.45	36.4
3	0.158	0.123	1.24	7.85	66.1	0.855	5.4	45.4
4	0.2	0.155	1.56	7.8	82.7	1.07	5.34	56.6
5	0.251	0.195	1.94	7.74	103	1.33	5.3	70.7
6	0.316	0.245	2.43	7.68	129	1.66	5.24	88.1
7	0.398	0.309	3.03	7.61	161	2.07	5.19	110
8	0.501	0.389	3.77	7.53	201	2.57	5.14	137
9	0.631	0.49	4.69	7.44	249	3.21	5.09	171
10	0.794	0.617	5.84	7.35	310	3.99	5.02	212
11	1	0.776	7.24	7.24	385	4.95	4.95	263
12	1.26	0.977	8.97	7.12	476	6.16	4.89	327
13	1.58	1.23	11.1	7.03	592	7.66	4.83	407
14	2	1.55	13.9	6.96	738	9.55	4.79	508
15	2.51	1.95	17.1	6.82	911	12	4.79	639
16	3.16	2.45	21.1	6.67	1,120	15.2	4.82	809
17	3.98	3.09	26	6.54	1,380	19.1	4.81	1,020
18	5.01	3.89	31.8	6.34	1,690	23.8	4.76	1,270
19	6.31	4.9	39.2	6.21	2,080	29.7	4.7	1,580
20	7.94	6.17	46.9	5.9	2,490	37.1	4.67	1,970
21	10	7.76	57.2	5.71	3,040	46	4.6	2,440
22	12.6	9.77	69.5	5.52	3,690	57.5	4.57	3,060
23	15.8	12.3	82.9	5.23	4,410	71.6	4.52	3,810
24	20	15.5	96.4	4.83	5,120	88.5	4.44	4,700
25	25.1	19.5	115	4.57	6,100	109	4.36	5,820
26	31.6	24.5	136	4.3	7,220	135	4.27	7,170
27	39.8	30.9	160	4.02	8,500	165	4.16	8,790
28	50.1	38.9	188	3.75	10,000	203	4.05	10,800
29	63.1	49	219	3.47	11,600	248	3.93	13,200
30	79.4	61.7	255	3.21	61.7	304	3.83	16,100
31	100	77.6	295	2.96	77.6	363	3.63	19,300

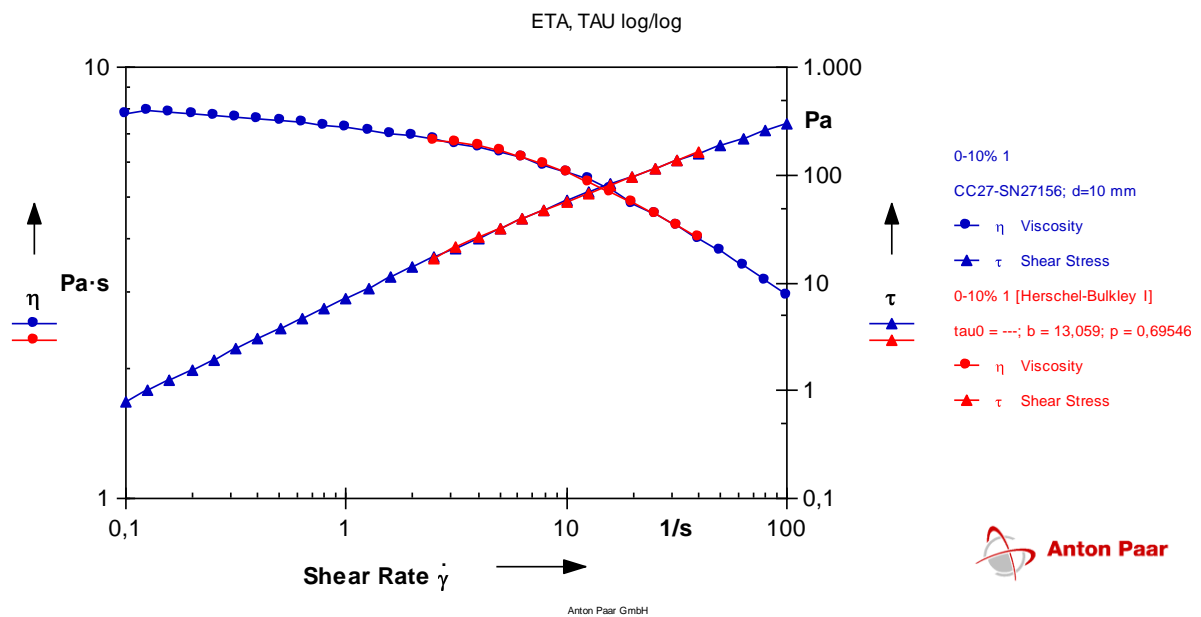


Gráfico 10. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 10% de agua.

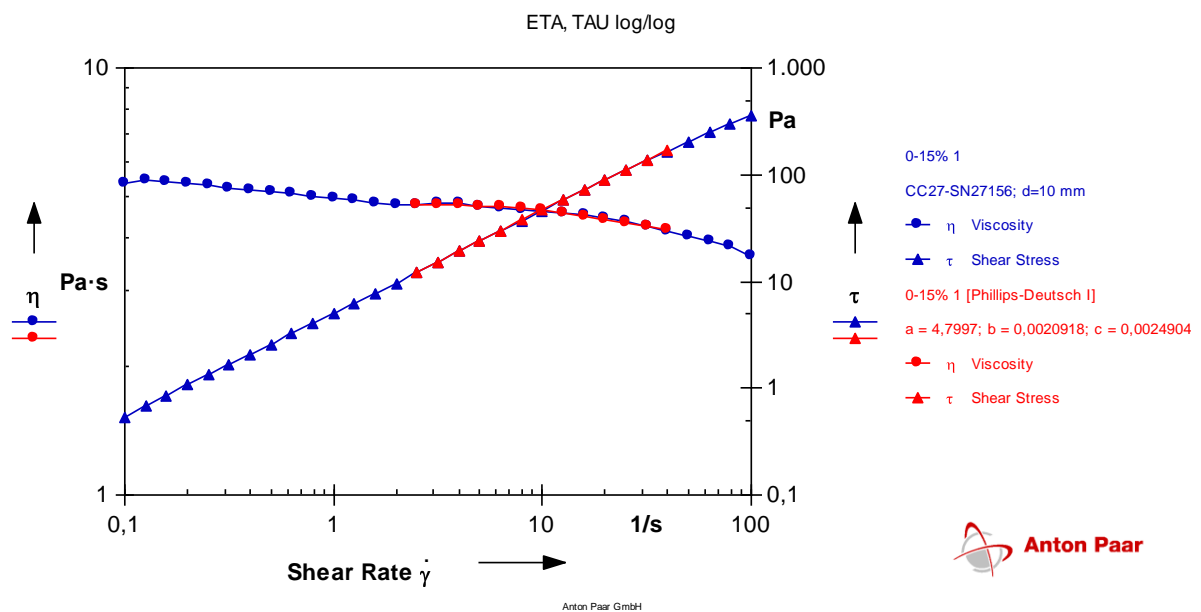


Gráfico 11. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 15% de agua.

Tabla 14. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 20% y 25% de agua a 30°C

Pts.	Gradiente de velocidad	Speed	20%			25%		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,0999	0,0776	0,556	5,56	29,5	0,0426	4,26	2,26
2	0,126	0,0977	0,715	5,68	38	0,0697	4,75	3,7
3	0,158	0,123	0,891	5,62	47,3	0,108	5,04	5,76
4	0,2	0,155	1,11	5,54	58,8	0,164	5,19	8,72
5	0,251	0,195	1,37	5,46	72,8	0,246	5,3	13,1
6	0,316	0,245	1,71	5,4	90,7	0,365	5,36	19,4
7	0,398	0,309	2,12	5,33	113	0,533	5,33	28,3
8	0,501	0,389	2,65	5,28	141	0,778	5,3	41,3
9	0,631	0,49	3,3	5,23	175	1,13	5,24	60
10	0,794	0,617	4,1	5,16	218	1,64	5,18	87,1
11	1	0,776	5,06	5,06	269	2,4	5,17	128
12	1,26	0,977	6,21	4,93	330	3,51	5,15	186
13	1,58	1,23	7,58	4,79	403	5,1	5,1	271
14	2	1,55	9,2	4,61	489	7,31	4,98	389
15	2,51	1,95	11,2	4,45	593	10,1	4,7	538
16	3,16	2,45	13,8	4,37	735	15	4,73	794
17	3,98	3,09	17,1	4,3	909	20,5	4,42	1,090
18	5,01	3,89	22	4,39	1,170	31,6	4,64	1,680
19	6,31	4,9	28,3	4,48	1,500	46,1	4,61	2,450
20	7,94	6,17	34,5	4,35	1,830	66,8	4,55	3,550
21	10	7,76	44,2	4,42	2,350	95	4,41	5,050
22	12,6	9,77	54,1	4,29	2,870	133	4,2	7,060
23	15,8	12,3	66,4	4,19	3,530	174	3,75	9,260
24	20	15,5	83	4,16	4,410	213	3,13	11,300
25	25,1	19,5	101	4,01	5,350	240	2,39	12,700
26	31,6	24,5	125	3,96	6,650	-	-	-
27	39,8	30,9	152	3,8	8,050	-	-	-
28	50,1	38,9	184	3,67	9,770	-	-	-
29	63,1	49	223	3,54	11,900	-	-	-
30	79,4	61,7	271	3,42	14,400	-	-	-
31	100	77,6	328	3,28	17,400	-	-	-

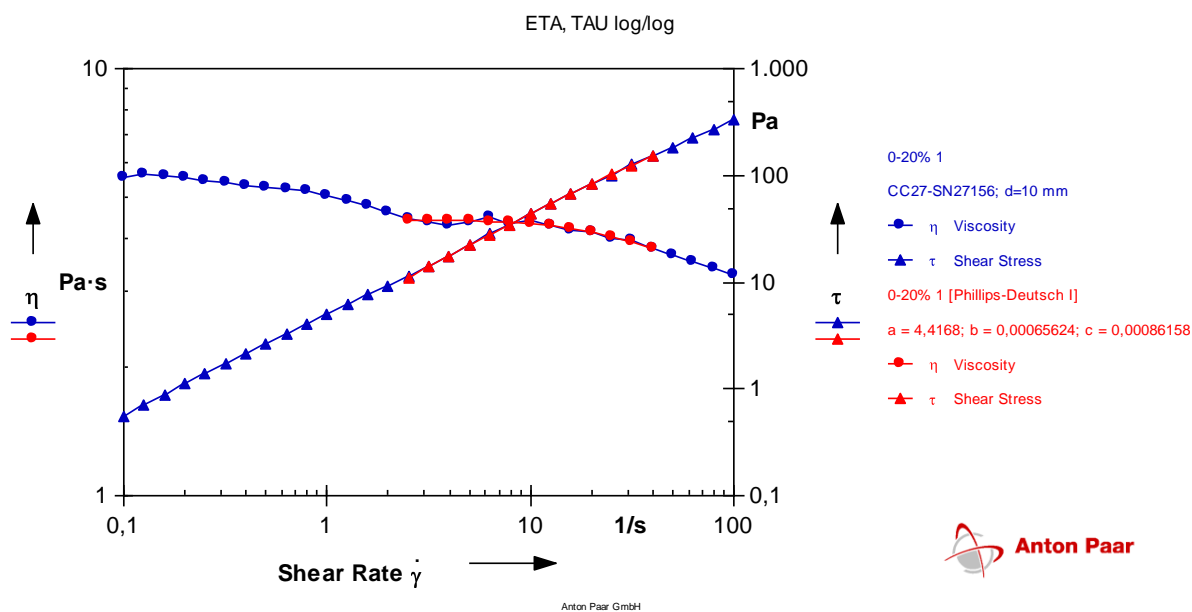


Gráfico 12. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 20% de agua.

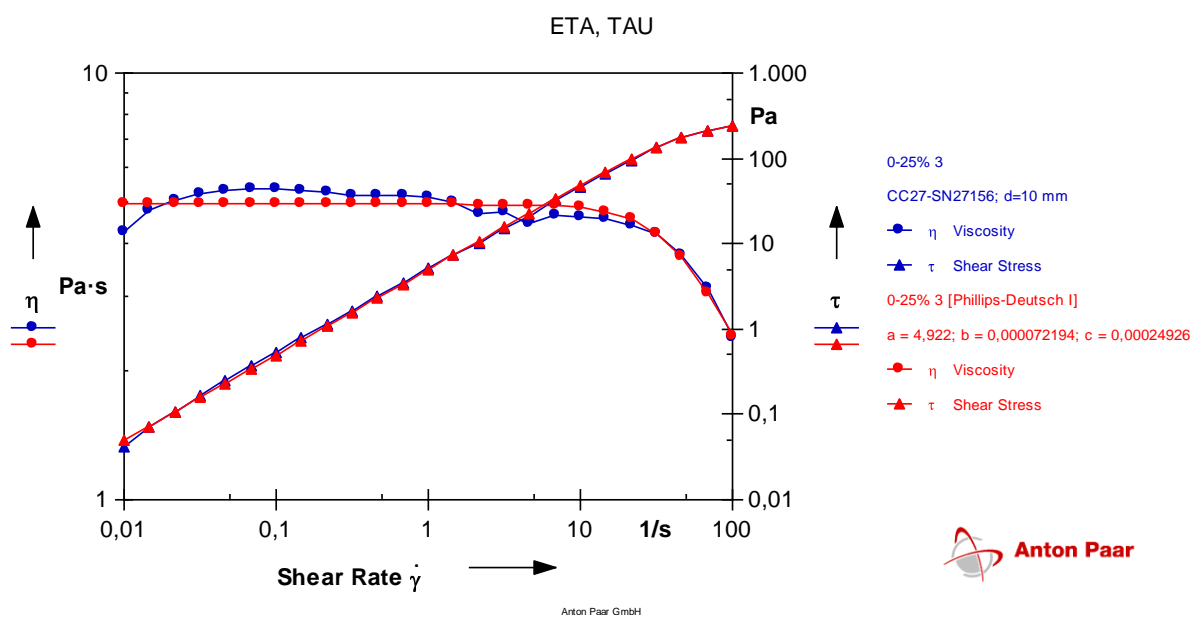


Gráfico 13. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 1 a 30°C con 25% de agua.

Tabla 15. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C

Pts.	Gradiente de velocidad	Speed	30%		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,0999	0,0776	0,019	1,9	1,01
2	0,126	0,0977	0,0338	2,3	1,8
3	0,158	0,123	0,0545	2,53	2,9
4	0,2	0,155	0,081	2,56	4,31
5	0,251	0,195	0,113	2,43	6
6	0,316	0,245	0,151	2,22	8,02
7	0,398	0,309	0,192	1,92	10,2
8	0,501	0,389	0,253	1,72	13,4
9	0,631	0,49	0,349	1,62	18,6
10	0,794	0,617	0,499	1,58	26,5
11	1	0,776	0,707	1,52	37,6
12	1,26	0,977	1,02	1,49	54,1
13	1,58	1,23	1,43	1,43	76
14	2	1,55	2,03	1,38	108
15	2,51	1,95	2,9	1,35	154
16	3,16	2,45	4,12	1,3	219
17	3,98	3,09	6,02	1,3	320
18	5,01	3,89	8,78	1,29	466
19	6,31	4,9	12,6	1,26	671
20	7,94	6,17	18,3	1,25	973
21	10	7,76	26,3	1,22	1,400
22	12,6	9,77	37,8	1,2	2,010
23	15,8	12,3	54,3	1,17	2,880
24	20	15,5	77,5	1,14	4,120
25	25,1	19,5	111	1,11	5,880

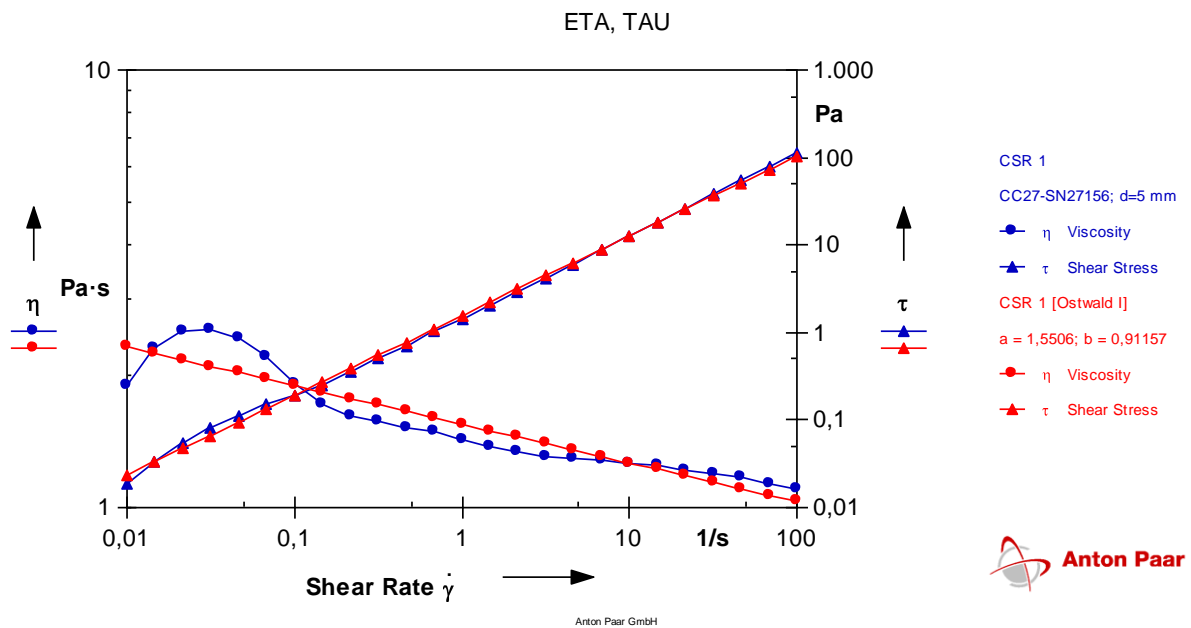


Gráfico 14. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo1 a 30°C con 30% de agua.

Tabla 16. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 25°C y 30°C

Pts.	Gradiente de Velocidad	Speed	25°C			30°C		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	0,372	37,2	19,7	0,325	32,5	17,3
2	0,0147	0,0114	0,546	37,2	29	0,476	32,4	25,3
3	0,0215	0,0167	0,803	37,3	42,7	0,682	31,6	36,2
4	0,0316	0,0245	1,18	37,3	62,7	0,944	29,8	50,1
5	0,0464	0,036	1,73	37,3	92	1,29	27,8	68,5
6	0,0681	0,0529	2,54	37,3	135	1,77	25,9	93,8
7	0,1	0,0776	3,72	37,2	197	2,45	24,5	130
8	0,147	0,114	5,43	37	288	3,47	23,6	184
9	0,215	0,167	7,89	36,6	419	4,96	23	264
10	0,316	0,245	11,4	36,1	607	7,16	22,6	380
11	0,464	0,36	16,4	35,4	873	10,3	22,3	549
12	0,681	0,529	23,5	34,5	1,250	14,9	21,9	791
13	1	0,776	33,6	33,6	1,780	21,3	21,3	1,130
14	1,47	1,14	47,7	32,5	2,540	30,2	20,6	1,600
15	2,15	1,67	66,9	31	3,550	42,4	19,7	2,250
16	3,16	2,45	92,5	29,2	4,910	59,7	18,9	3,170
17	4,64	3,6	129	27,8	6,850	82,1	17,7	4,360
18	6,81	5,29	175	25,7	9,310	113	16,6	6,010
19	10	7,76	236	23,6	12,500	154	15,4	8,210
20	14,7	11,4	312	21,3	16,600	209	14,3	11,100
21	21,5	16,7	410	19	21,800	279	13	14,800
22	31,6	24,5	530	16,8	28,200	369	11,7	19,600
23	46,4	36	678	14,6	36,000	482	10,4	25,600
24	68,1	52,9	858	12,6	45,600	623	9,14	33,100
25	100	77,6	1,080	10,8	57,300	795	7,95	42,300

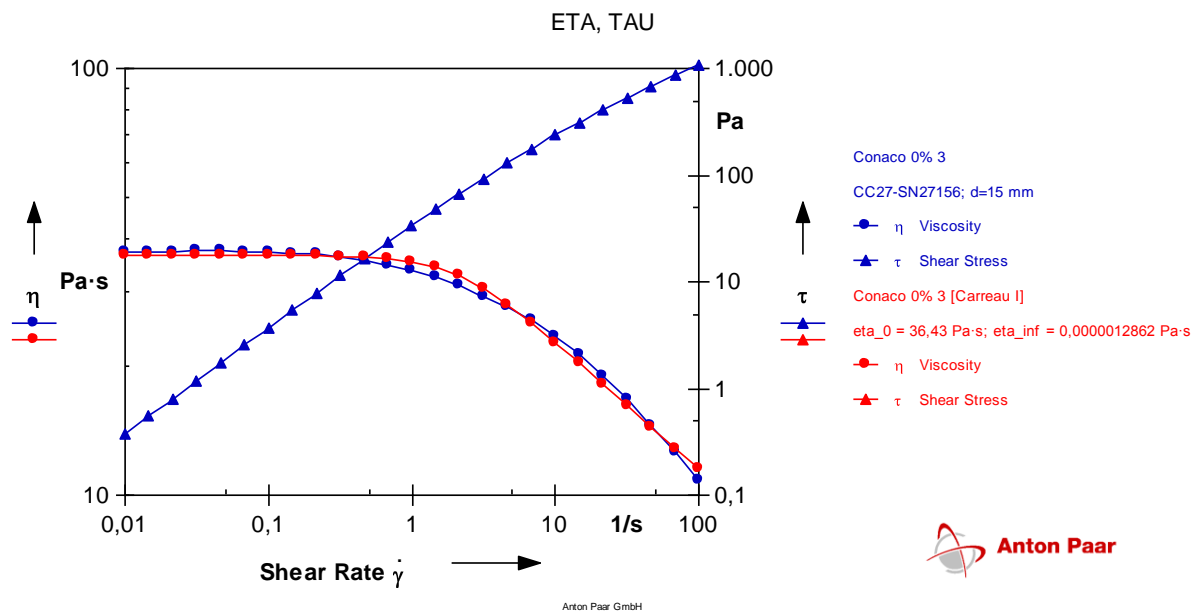


Gráfico 15. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 25°C.

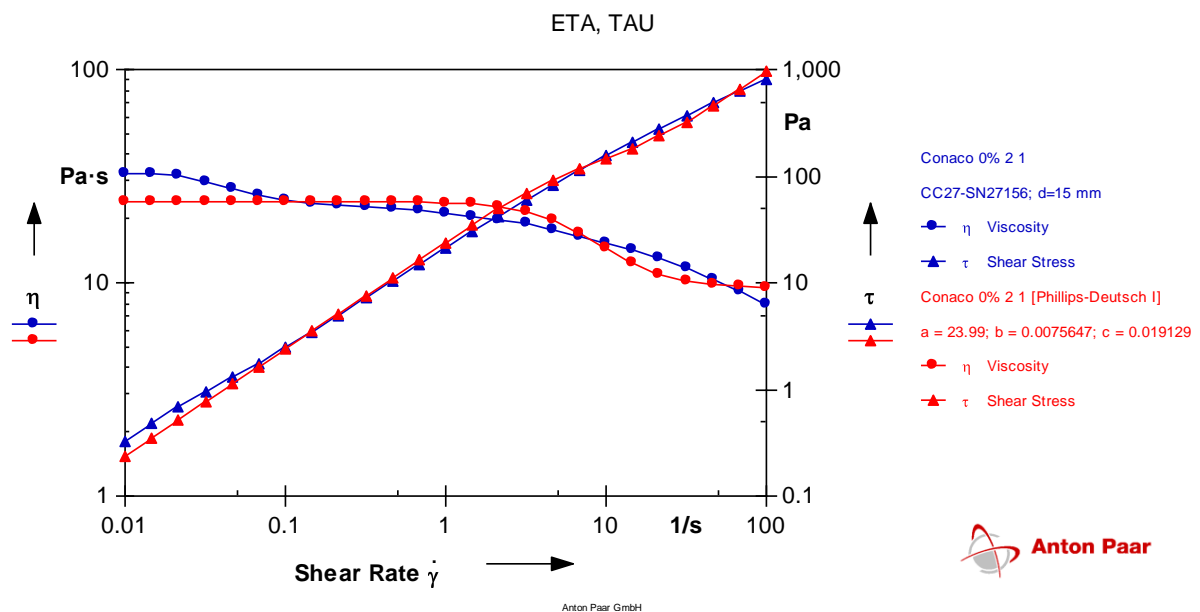


Gráfico 16. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C.

Tabla 17. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 35°C y 40°C

Pts.	Gradiente de Velocidad	Speed	35°C			40°C		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	0,128	12,8	6,8	0,0676	6,77	3,59
2	0,0147	0,0114	0,185	12,6	9,81	0,097	6,61	5,15
3	0,0215	0,0167	0,266	12,4	14,1	0,144	6,67	7,63
4	0,0316	0,0245	0,384	12,2	20,4	0,211	6,66	11,2
5	0,0464	0,036	0,556	12	29,5	0,309	6,66	16,4
6	0,0681	0,0529	0,8	11,7	42,5	0,452	6,63	24
7	0,1	0,0776	1,15	11,5	61,4	0,656	6,56	34,9
8	0,147	0,114	1,67	11,4	88,6	0,953	6,49	50,6
9	0,215	0,167	2,41	11,2	128	1,38	6,4	73,3
10	0,316	0,245	3,49	11	185	1,99	6,3	106
11	0,464	0,36	5,06	10,9	269	2,88	6,2	153
12	0,681	0,529	7,31	10,7	388	4,17	6,12	222
13	1	0,776	10,6	10,6	562	6,02	6,02	320
14	1,47	1,14	15,2	10,4	807	8,67	5,9	460
15	2,15	1,67	21,7	10,1	1,150	12,5	5,82	666
16	3,16	2,45	30,7	9,7	1,630	18,1	5,71	960
17	4,64	3,6	43,6	9,39	2,320	25,8	5,55	1,370
18	6,81	5,29	61,2	8,98	3,250	36,6	5,37	1,940
19	10	7,76	85,4	8,54	4,540	51,9	5,19	2,760
20	14,7	11,4	118	8,02	6,250	73,1	4,98	3,890
21	21,5	16,7	161	7,49	8,570	102	4,74	5,420
22	31,6	24,5	219	6,93	11,600	142	4,48	7,530
23	46,4	36	295	6,35	15,700	194	4,19	10,300
24	68,1	52,9	391	5,74	20,800	264	3,87	14,000
25	100	77,6	514	5,14	27,300	355	3,55	18,900

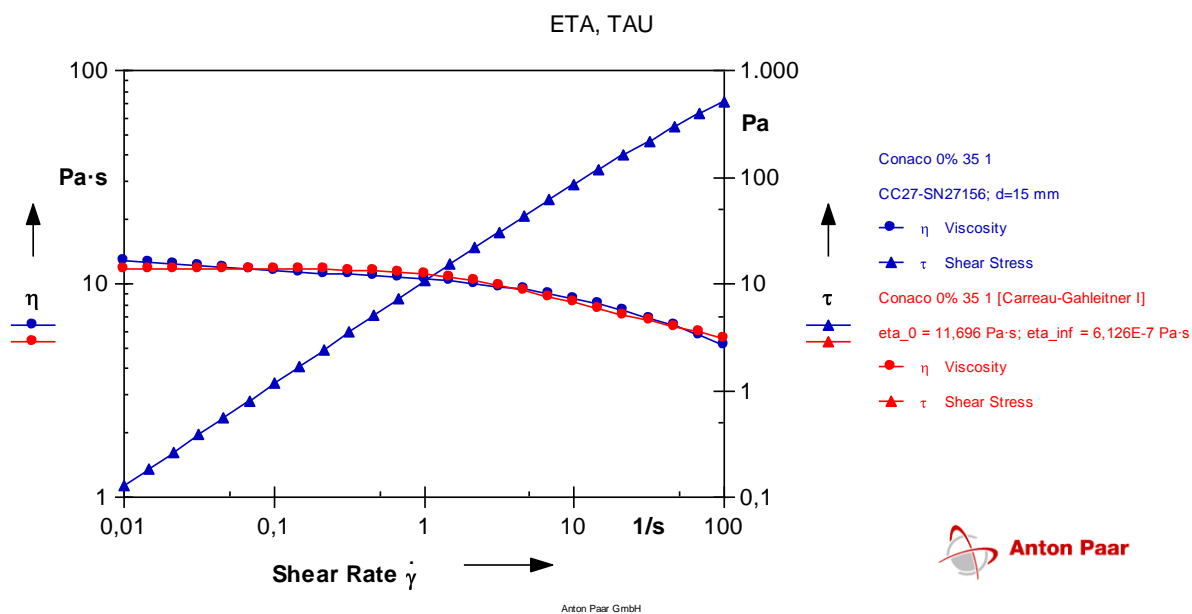


Gráfico 17. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 35°C.

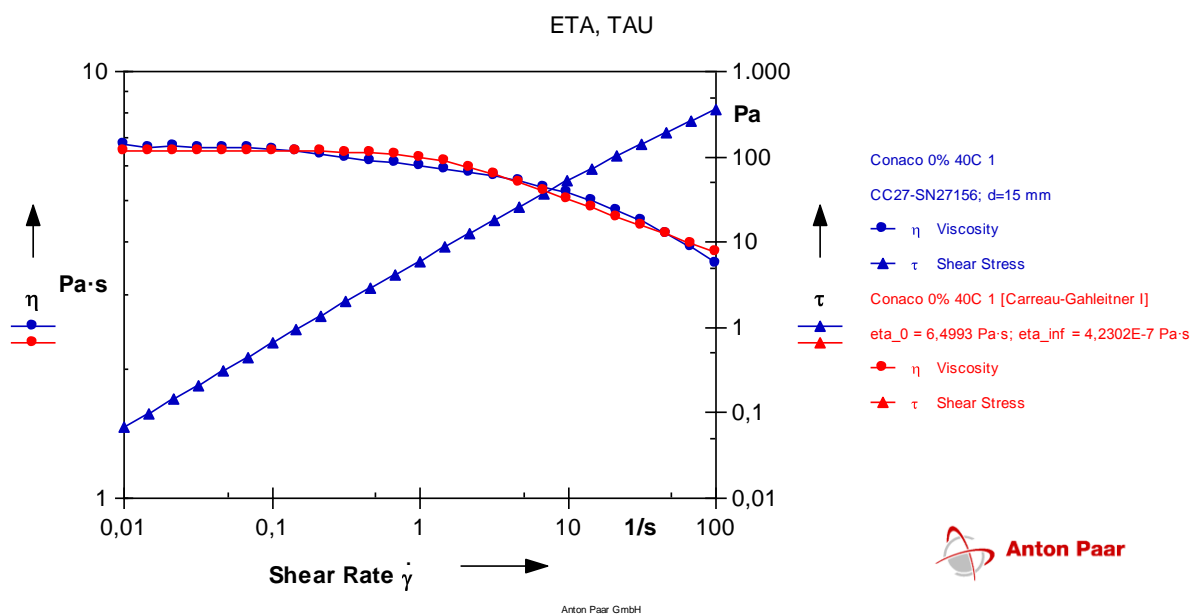


Gráfico 18. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 40°C.

Tabla 18. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 a 45°C y 50°C

Pts.	Gradiente de velocidad	Speed	45°C			50°C		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,01	0,00776	0,0389	3,89	2,07	0,0158	1,58	0,841
2	0,0147	0,0114	0,057	3,88	3,03	0,0246	1,68	1,31
3	0,0215	0,0167	0,0833	3,87	4,43	0,0368	1,71	1,96
4	0,0316	0,0245	0,122	3,85	6,47	0,0552	1,75	2,93
5	0,0464	0,036	0,177	3,8	9,38	0,0819	1,76	4,35
6	0,0681	0,0529	0,256	3,75	13,6	0,121	1,78	6,45
7	0,1	0,0776	0,37	3,7	19,6	0,179	1,79	9,53
8	0,147	0,114	0,534	3,63	28,3	0,265	1,81	14,1
9	0,215	0,167	0,776	3,6	41,2	0,394	1,83	20,9
10	0,316	0,245	1,13	3,58	60,2	0,581	1,84	30,9
11	0,464	0,36	1,65	3,56	87,8	0,85	1,83	45,2
12	0,681	0,529	2,4	3,53	128	1,25	1,83	66,2
13	1	0,776	3,5	3,5	186	1,83	1,83	97,3
14	1,47	1,14	5,09	3,47	270	2,69	1,84	143
15	2,15	1,67	7,37	3,42	392	3,95	1,83	210
16	3,16	2,45	10,7	3,37	567	5,77	1,82	306
17	4,64	3,6	15,4	3,32	818	8,41	1,81	447
18	6,81	5,29	22,1	3,24	1,170	12,3	1,8	651
19	10	7,76	31,5	3,15	1,680	17,8	1,78	943
20	14,7	11,4	44,8	3,05	2,380	25,7	1,75	1,360
21	21,5	16,7	63,4	2,94	3,370	36,9	1,71	1,960
22	31,6	24,5	89	2,81	4,730	52,8	1,67	2,800
23	46,4	36	124	2,67	6,590	75,1	1,62	3,990
24	68,1	52,9	171	2,51	9,100	106	1,56	5,640
25	100	77,6	235	2,35	12,500	149	1,49	7,920

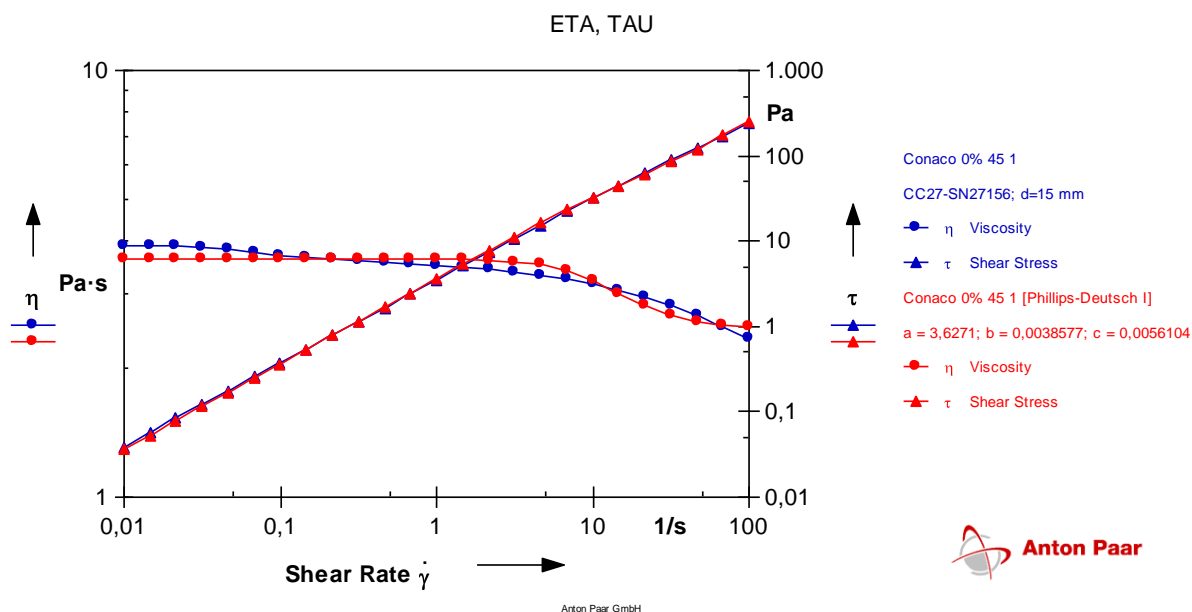


Gráfico 19. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 45°C.

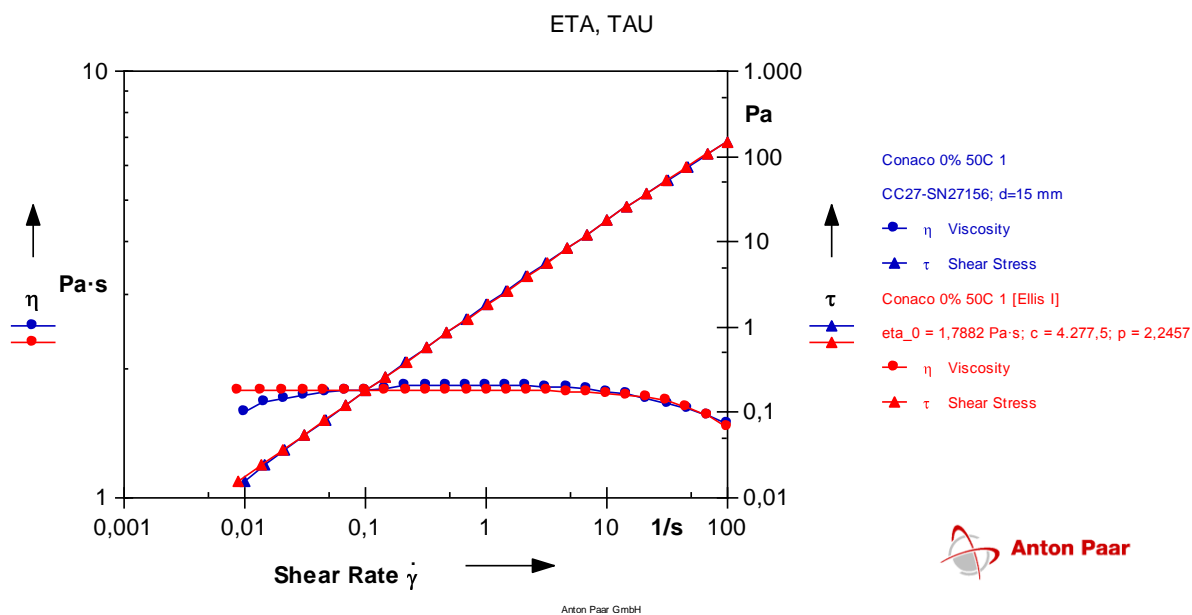


Gráfico 20. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 50°C.

Tabla 19. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 10% y 15% de agua a 30°C

Pts.	Gradiente de Velocidad	Speed	10%			15%		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,0999	0,0776	0,491	49,1	26,1	0,721	72,1	38,3
2	0,126	0,0977	0,729	49,7	38,8	1,07	73,2	57,1
3	0,158	0,123	1,07	49,9	57,1	1,58	73,1	83,7
4	0,2	0,155	1,59	50,1	84,2	2,31	73	123
5	0,251	0,195	2,33	50,3	124	3,36	72,5	179
6	0,316	0,245	3,43	50,3	182	4,9	71,9	260
7	0,398	0,309	5,03	50,3	267	7,1	71	377
8	0,501	0,389	7,37	50,2	391	10,2	69,6	543
9	0,631	0,49	10,7	49,9	571	14,6	67,9	777
10	0,794	0,617	15,6	49,3	828	20,8	65,6	1,100
11	1	0,776	22,4	48,3	1,190	29,2	62,8	1,550
12	1,26	0,977	32	46,9	1,700	40,5	59,4	2,150
13	1,58	1,23	44,8	44,8	2,380	55,3	55,3	2,940
14	2	1,55	59,2	40,3	3,140	74,5	50,7	3,960
15	2,51	1,95	72	33,4	3,830	98,8	45,9	5,250
16	3,16	2,45	102	32,3	5,430	134	42,4	7,120
17	3,98	3,09	137	29,6	7,290	170	36,7	9,050
18	5,01	3,89	185	27,2	9,830	215	31,5	11,400
19	6,31	4,9	241	24,1	12,800	268	26,8	14,200
20	7,94	6,17	313	21,3	16,600	333	22,7	17,700
21	10	7,76	392	18,2	20,800	404	18,8	21,500
22	12,6	9,77	499	15,8	26,500	491	15,5	26,100
23	15,8	12,3	600	12,9	31,900	581	12,5	30,900
24	20	15,5	696	10,2	37,000	678	9,96	36,000
25	25,1	19,5	802	8,01	42,600	767	7,66	40,700

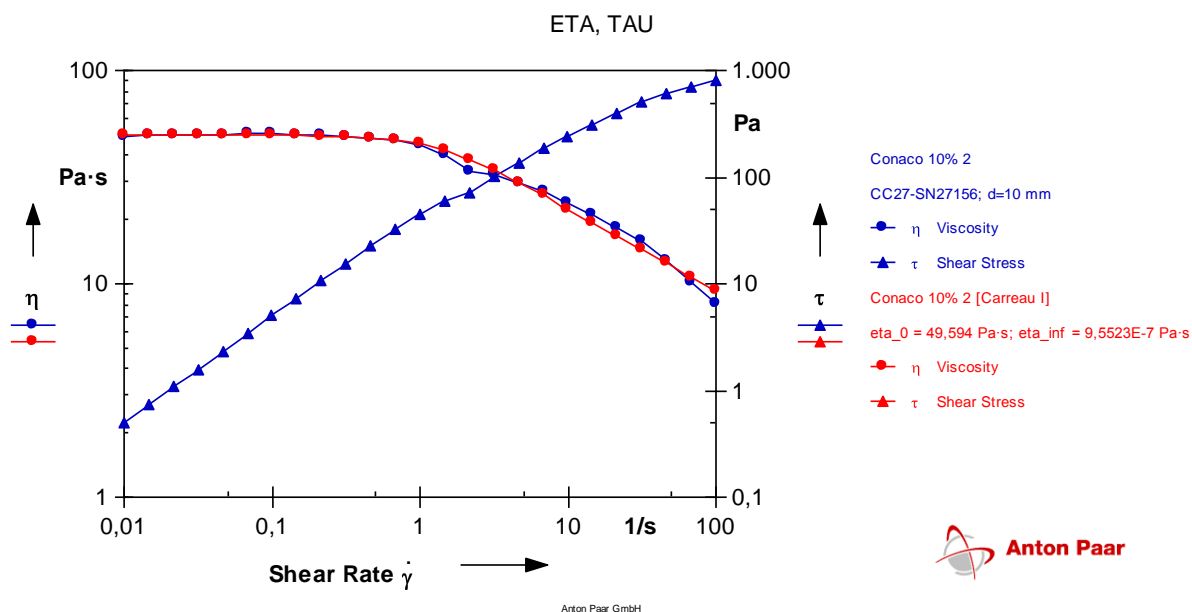


Gráfico 21. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C con 10% de agua.

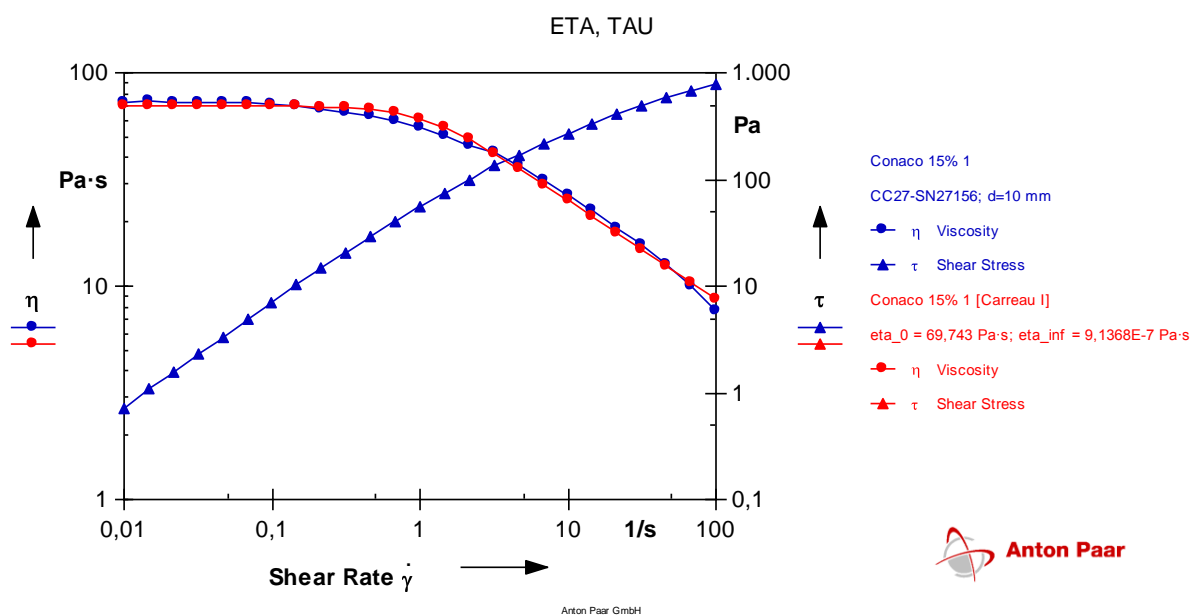


Gráfico 22. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C con 15% de agua.

Tabla 20. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 17,5% y 20% de agua a 30°C

Pts.	Gradiente de Velocidad	Speed	17,5%			20%		
			Esfuerzo	Viscosidad	Torque	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
	[1/s]	[1/min]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]	[Pa]	[Pa·s]	[μNm]
1	0,0999	0,0776	0,304	30,4	16,2	0,807	80,8	42,9
2	0,126	0,0977	0,475	32,3	25,2	1,23	83,7	65,2
3	0,158	0,123	0,728	33,8	38,7	1,81	84,2	96,3
4	0,2	0,155	1,11	35	58,7	2,66	84	141.0
5	0,251	0,195	1,66	35,9	88,4	3,88	83,5	206.0
6	0,316	0,245	2,48	36,4	132	5,62	82,5	298.0
7	0,398	0,309	3,65	36,5	194	8,09	80,9	430.0
8	0,501	0,389	5,34	36,4	284	11,6	78,8	614.0
9	0,631	0,49	7,72	35,8	410	16,4	75,9	869.0
10	0,794	0,617	11,1	35	588	22,9	72,3	1210.0
11	1	0,776	15,8	34	839	31,6	68,2	1680.0
12	1,26	0,977	22,2	32,6	1,180	43,3	63,5	2300.0
13	1,58	1,23	30,1	30,1	1,600	59	59	3140.0
14	2	1,55	39,2	26,7	2,080	79,2	53,9	4210.0
15	2,51	1,95	53,6	24,9	2,850	104	48,5	5550.0
16	3,16	2,45	77,5	24,5	4,120	135	42,5	7150.0
17	3,98	3,09	96	20,7	5,100	169	36,5	9000.0
18	5,01	3,89	128	18,8	6,810	216	31,7	11500.0
19	6,31	4,9	170	17	9,010	268	26,8	14200.0
20	7,94	6,17	218	14,8	11,600	317	21,6	16900.0
21	10	7,76	271	12,6	14,400	388	18	20600.0
22	12,6	9,77	320	10,1	17,000	459	14,5	24400.0
23	15,8	12,3	349	7,51	18,500	489	10,5	26000.0
24	20	15,5	328	4,81	17,400	492	7,22	26100.0
25	25,1	19,5	157	1,56	8,320	433	4,33	23000.0

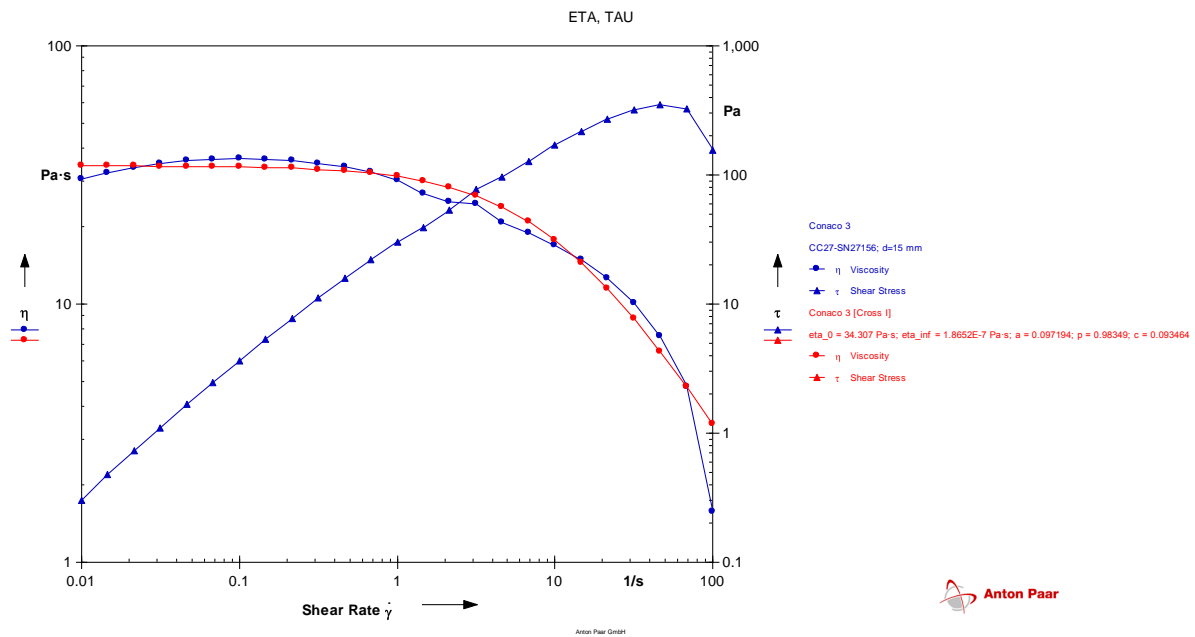


Gráfico 23. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C con 17,5% de agua.

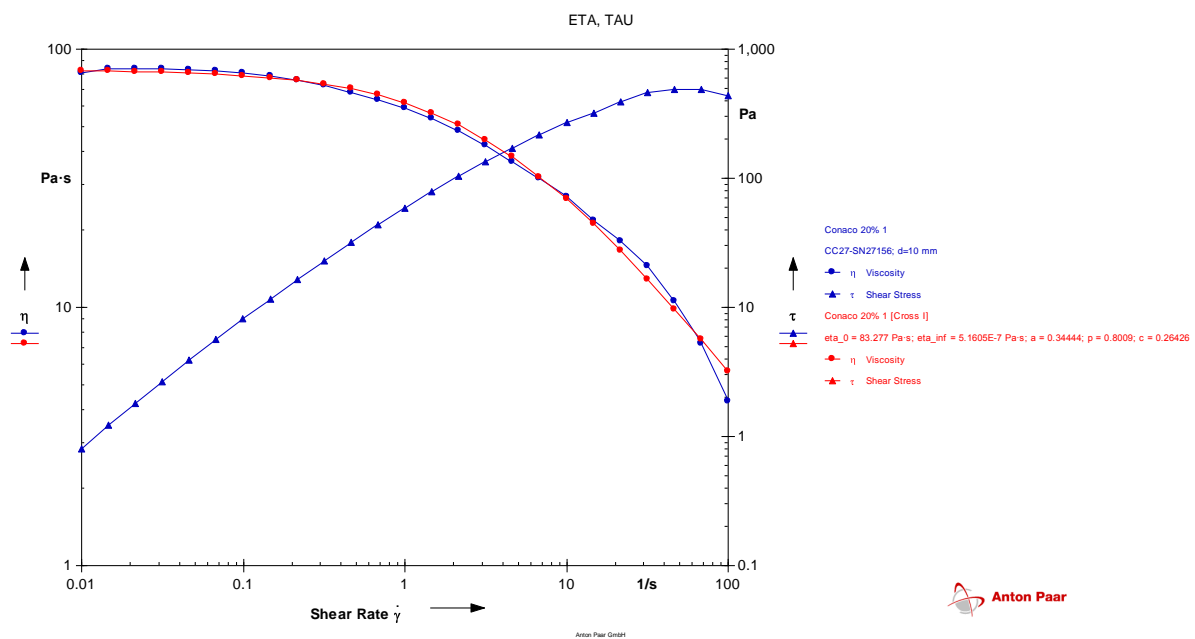


Gráfico 24. Reograma proporcionado por el software RHEOPLUS del crudo 2 a 30°C con 20% de agua.

6. PROCESAMIENTO DE DATOS.

6.1. Determinación de la viscosidad cinemática a 40°C.

Tabla 21. Constantes C y J para los viscosímetros utilizados.

Modelo Viscosímetro	Temperatura, °C	Constantes, [cSt/s]	
		C	J
700 A 684	40	104,800	69,690
	100	-	-
500 Z 906	40	8,063	6,042
	100	8,130	6,092

6.1.1. Cálculo de la viscosidad Cinemática en los bulbos C y J para el crudo 1.

$$\vartheta = \frac{\vartheta_C + \vartheta_J}{2}$$

$$\vartheta = \frac{\text{Constante } C, \left[\frac{cSt}{s}\right] * t_C, [s] + \text{Constante } J, \left[\frac{cSt}{s}\right] * t_J, [s]}{2}$$

$$\vartheta = \frac{8,063 \left[\frac{cSt}{s}\right] * 537 [s] + 6,042 \left[\frac{cSt}{s}\right] * 775 [s]}{2}$$

$$\vartheta = 4506,2 \text{ cSt}$$

6.1.2. Cálculo de la densidad Relativa, para el Crudo 1.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\frac{60^{\circ}F}{\rho_{60^{\circ}F}}} - 131,5$$

$$\frac{60^{\circ}F}{\rho_{60^{\circ}F}} = \frac{141,5}{^{\circ}API + 131,5}$$

$$\frac{60^{\circ}F}{\rho_{60^{\circ}F}} = \frac{141,5}{17,1 + 131,5}$$

$$\frac{60^{\circ}F}{\rho_{60^{\circ}F}} = 0,9522$$

Tabla 22. Resumen de la caracterización básica de los crudos empleados.

Muestra	%BSW	API a 60°F	$\rho_{60^{\circ}F/60^{\circ}F}$	v, cSt	% Azufre
Crudo 1	0,3	17.1	0.9522	4506,2	1.9122
Crudo 2	40	11.8	0.9874	24998,9	1.5263

Tabla 23. Datos de la variación de la viscosidad aparente con la temperatura para los crudos analizados, ver tablas Anexo C.

T, °C	Crudo 1	Crudo 2
	Pa.s	Pa.s
25		37,2
30	5,38	32,5
35	3,17	12,8
40	2,63	6,77
45	1,82	3,89
50	0,571	1,58

6.2. Determinación del porcentaje óptimo de agua.

6.2.1. Modelos reológicos para distintas concentraciones de agua a 30°C.

Tabla 24. Modelos reológicos para el crudo 1 a diferentes concentraciones de agua, a 30°C.

Modelo %Agua	Ecuación	R ²	Desviación estándar	η, Pa.s
Carreau 0%	$\eta = 4.9208 * 10^{-7} + \frac{5.3516}{(1 + 30.244 * \gamma^2)^{1,3608*10^{-2}}}$	0.9724	0.0579 7	5.35
Phillips- Deustch 10%	$\eta = 5.1185 * \frac{1 + 4.3308 * 10^{-3} * \gamma^2}{1 + 6.14 * 10^{-3} * \gamma^2}$	0.9997	0.6934	5.58
Phillips- Deustch 15%	$\eta = 4.7997 * \frac{1 + 2.100 * 10^{-3} * \gamma^2}{1 + 2.500 * 10^{-3} * \gamma^2}$	0.9999	0.4890	4.8
Phillips- Deustch 20%	$\eta = 4.4168 * \frac{1 + 6.5624 * 10^{-4} * \gamma^2}{1 + 8.6158 * 10^{-4} * \gamma^2}$	0.9999	0.5423	4.42
Phillips- Deustch 25%	$\eta = 4.9220 * \frac{1 + 7.2194 * 10^{-5} * \gamma^2}{1 + 7.4926 * 10^{-4} * \gamma^2}$	0.9993	1.8482	4.92
Ostwald 30%	$\eta = 1.5506 * \gamma^{0.9116}$	0.9951	1.9471	1.60

Tabla 25. Modelos reológicos para el crudo 2 a diferentes concentraciones de agua, a 30°C.

Modelo %Agua	Ecuación	R ²	Desviación estándar	η, Pa.s
Phillips Deustch 0%	$\eta = 23.99 * \frac{1 + 7.5647 * 10^{-3} * \gamma^2}{1 + 1,9129 * 10^{-2} * \gamma^2}$	0.9707	37.045	21,31
Carreau 10%	$\eta = 9.1368 * 10^{-7} + \frac{69.743}{(1 + 0.8963 * \gamma^2)^{23.189*10^{-2}}}$	0.9865	2.7615	16,6
Carreau 15%	$\eta = 9.5523 * 10^{-7} + \frac{49.594}{(1 + 30.244 * \gamma^2)^{1,3608*10^{-2}}}$	0.9910	1.4357	17,7
Cross 17,5%	$\eta = 1.8652 * 10^{-7} + \frac{34.307}{1 + (9.3464 * 10^{-2} * \gamma)^{0.9835}}$	0.9664	2.0561	3,67
Cross 20%	$\eta = 5.1605 * 10^{-7} + \frac{83.277}{1 + (2.6426 * 10^{-1} * \gamma)^{0.809}}$	0.9957	1.8797	9,82

Se determina la concentración de agua con la que se van a formar las emulsiones, observando a que concentración existe un cambio en el comportamiento reológico de la mezcla, se aprecia que para el crudo 1 y Crudo 2, dicho cambio ocurre con el 30% y 17.5% de agua respectivamente.

6.3. Reogramas de las emulsiones preparadas con el agente emulsionante.

Se determina la concentración óptima de agente emulsionante como la concentración a la que se tiene un valor máximo en la viscosidad aparente de la emulsión, en el Anexo C se muestran los reogramas obtenidos para la determinación de la concentración del agente emulsionante cada uno de los aditivos probados en cada muestra de crudo.

Tabla 26. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad.

%Ad,	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1/s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s
0,01	1,9	1,13	1,65	2,51	1,9	3,35
0,0147	2,3	1,17	1,91	2,46	2,17	3,9
0,0215	2,53	1,21	2,06	2,44	2,39	4,26
0,0316	2,56	1,27	2,13	2,42	2,51	4,37
0,0464	2,43	1,31	2,07	2,3	2,36	4,04
0,0681	2,22	1,36	1,76	2,19	2,1	3,49
0,1	1,92	1,4	1,53	2,16	1,87	3,11
0,147	1,72	1,46	1,46	2,15	1,78	2,99
0,215	1,62	1,49	1,42	2,14	1,73	2,91
0,316	1,58	1,52	1,37	2,15	1,7	2,83
0,464	1,52	1,52	1,31	2,15	1,67	2,76
0,681	1,49	1,54	1,25	2,12	1,63	2,67
1	1,43	1,54	1,22	2,1	1,59	2,61
1,47	1,38	1,55	1,19	2,07	1,54	2,53
2,15	1,35	1,55	1,18	2,05	1,5	2,44
3,16	1,3	1,55	1,17	2,01	1,47	2,36
4,64	1,3	1,54	1,16	1,97	1,44	2,27
6,81	1,29	1,54	1,15	1,93	1,4	2,18
10	1,26	1,53	1,13	1,89	1,36	2,08
14,7	1,25	1,52	1,13	1,83	1,32	1,98
21,5	1,22	1,51	1,11	1,76	1,28	1,88
31,6	1,2	1,48	1,09	1,68	1,24	1,77
46,4	1,17	1,45	1,07	1,6	1,19	1,67
68,1	1,14	1,42	1,05	1,5	1,14	1,55
100	1,11	1,37	1,02	1,42	1,1	1,41

Tabla 27. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de Agente Emulsionante 2 a distintos gradientes de Velocidad

%Ad,	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1/s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s
0,01	1,9	5,46	5,76	6,06	5,6	5,74
0,0147	2,3	5,93	5,93	5,99	5,54	5,65
0,0215	2,53	6,17	5,87	5,93	5,51	5,6
0,0316	2,56	6,27	5,96	5,89	5,5	5,53
0,0464	2,43	6,27	5,98	5,82	5,48	5,52
0,0681	2,22	6,22	5,93	5,77	5,45	5,46
0,1	1,92	6,1	5,85	5,72	5,4	5,41
0,147	1,72	5,94	5,75	5,65	5,36	5,33
0,215	1,62	5,73	5,63	5,58	5,31	5,26
0,316	1,58	5,53	5,52	5,54	5,27	5,2
0,464	1,52	5,35	5,44	5,51	5,25	5,18
0,681	1,49	5,18	5,34	5,47	5,2	5,11
1	1,43	5,07	5,26	5,42	5,14	5,04
1,47	1,38	5,05	5,16	5,27	5,03	5
2,15	1,35	5,01	5,1	5,09	4,94	4,94
3,16	1,3	4,88	5,03	4,93	4,86	4,86
4,64	1,3	4,8	4,93	4,97	4,82	4,81
6,81	1,29	4,63	4,84	4,89	4,74	4,73
10	1,26	4,47	4,67	4,78	4,66	4,7
14,7	1,25	4,24	4,52	4,62	4,57	4,61
21,5	1,22	4,01	4,32	4,38	4,44	4,51
31,6	1,2	3,73	4,06	4,03	4,3	4,43
46,4	1,17	3,43	3,74	3,67	4,04	4,24
68,1	1,14	3,29	3,76	2,31	3,82	3,12
100	1,11	3,18	3,56	1,8	3,65	2,8

Tabla 28. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 17,5% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad

%Ad,	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1/s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s	η , Pa,s
0,00999	30,4	23,1	29,3	15,8	15,2	13,4
0,0147	32,3	23,5	24,5	15,9	16,3	13,4
0,0215	33,8	23,7	24,7	15,7	16,8	13,4
0,0316	35,0	23,6	24,7	15,6	16,8	13,4
0,0464	35,9	23,6	24,3	15,8	16,6	13,4
0,0681	36,4	23,4	23,8	15,8	16,1	13,4
0,1	36,5	23,1	23,1	15,9	15,4	13,4
0,147	36,4	22,8	22,3	16	14,4	13,4
0,215	35,8	22,4	21,5	16	13,4	13,4
0,316	35,0	21,9	20,4	15,9	11,9	13,4
0,464	34,0	21,4	19,4	15,5	10,4	13,4
0,681	32,6	20,8	18,5	15	9,05	13,4
1	30,1	20,2	17,4	13,9	8,12	13,4
1,47	26,7	19,4	16,2	13,2	7,12	13,4
2,15	24,9	18,4	14,9	12,4	6,04	13,4
3,16	24,5	17,3	14	11,9	5,3	13,3
4,64	20,7	16,4	11,2	10,7	4,1	13,3
6,82	18,8	15,2	9,85	8,74	2,89	13,2
10	17,0	13,8	6,72	6,54	2,3	13
14,7	14,8	12,2	4,79	2,54	1,78	12,6
21,6	12,6	9,9	3,33	1,63	1,32	11,8
31,6	10,1	8,73	1,86	1,21	0,797	10,2
46,4	7,51	6,99	0,772	0,4	0,268	7,7
68,2	4,81	2,41	0,178	0,212	0,122	4,46
100	1,56	0,534	0,0768	0,159	0,115	1,72

Tabla 29. Datos proporcionados por el software RHEOPLUS, para el crudo 2 con 17,5% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 2 a distintos gradientes de velocidad

%Ad,	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1/s	μ , Pa,s	μ , Pa,s	μ , Pa,s	μ , Pa,s	μ , Pa,s	μ , Pa,s
0,00999	30,4	43,3	32,5	31,7	26,9	24,9
0,0147	32,3	44,3	33	33,2	27,4	25,5
0,0215	33,8	44,1	32,8	33,5	27,3	25,3
0,0316	35,0	43,6	32,6	33,4	26,9	24,9
0,0464	35,9	43	32,2	33,1	26,6	24,2
0,0681	36,4	42,2	31,7	32,6	26,2	23,5
0,1	36,5	41,4	31,2	32	25,6	22,9
0,147	36,4	40,4	30,6	31,4	25,1	22,3
0,215	35,8	39,3	30	30,9	24,5	21,6
0,316	35,0	38,2	29,3	30,4	23,8	21
0,464	34,0	36,9	28,6	29,8	23	20,3
0,681	32,6	35,6	28	29,1	22,2	19,8
1	30,1	34,1	27,2	28,2	21,3	19,2
1,47	26,7	32,6	26	27,2	20,4	18,6
2,15	24,9	31,3	24,2	25,7	19,4	17,8
3,16	24,5	29,8	22,6	23,1	18,3	16,7
4,64	20,7	28,2	21,6	23	17,2	15,3
6,82	18,8	26,5	20,5	23	16,1	14,2
10	17,0	25	18,6	20,6	14,6	14,1
14,7	14,8	23,2	18,1	19,6	13,3	12,6
21,6	12,6	21,7	16,4	17,1	12	12,3
31,6	10,1	20,3	15,5	16	11,1	11,1
46,4	7,51	18,5	14,2	13,5	9,27	9,43
68,2	4,81	16,7	11,8	12,2	7,11	7,73
100	1,56	15	10,6	11,9	5,21	7,97

6.3.1. Determinación concentración óptima de agente emulsionante.

Analizando la información anterior tenemos la concentración óptima de agente emulsionante.

Se lo determina por el punto máximo en la curva que representa el comportamiento de la viscosidad en función del porcentaje de aditivo reológico.

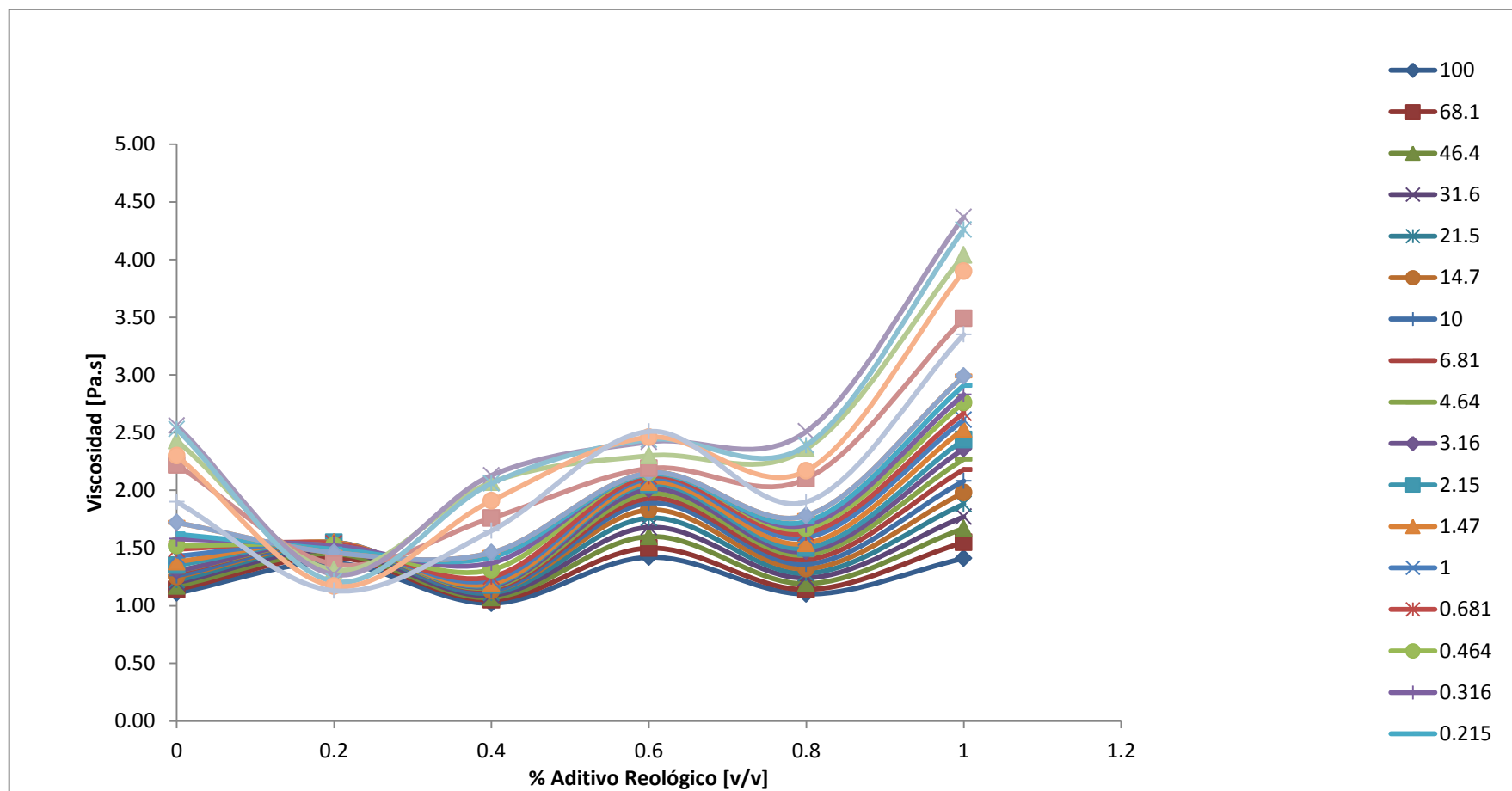


Grafico 26. Curva viscosidad en función de % de aditivo reológico a diferentes gradientes de velocidad para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad

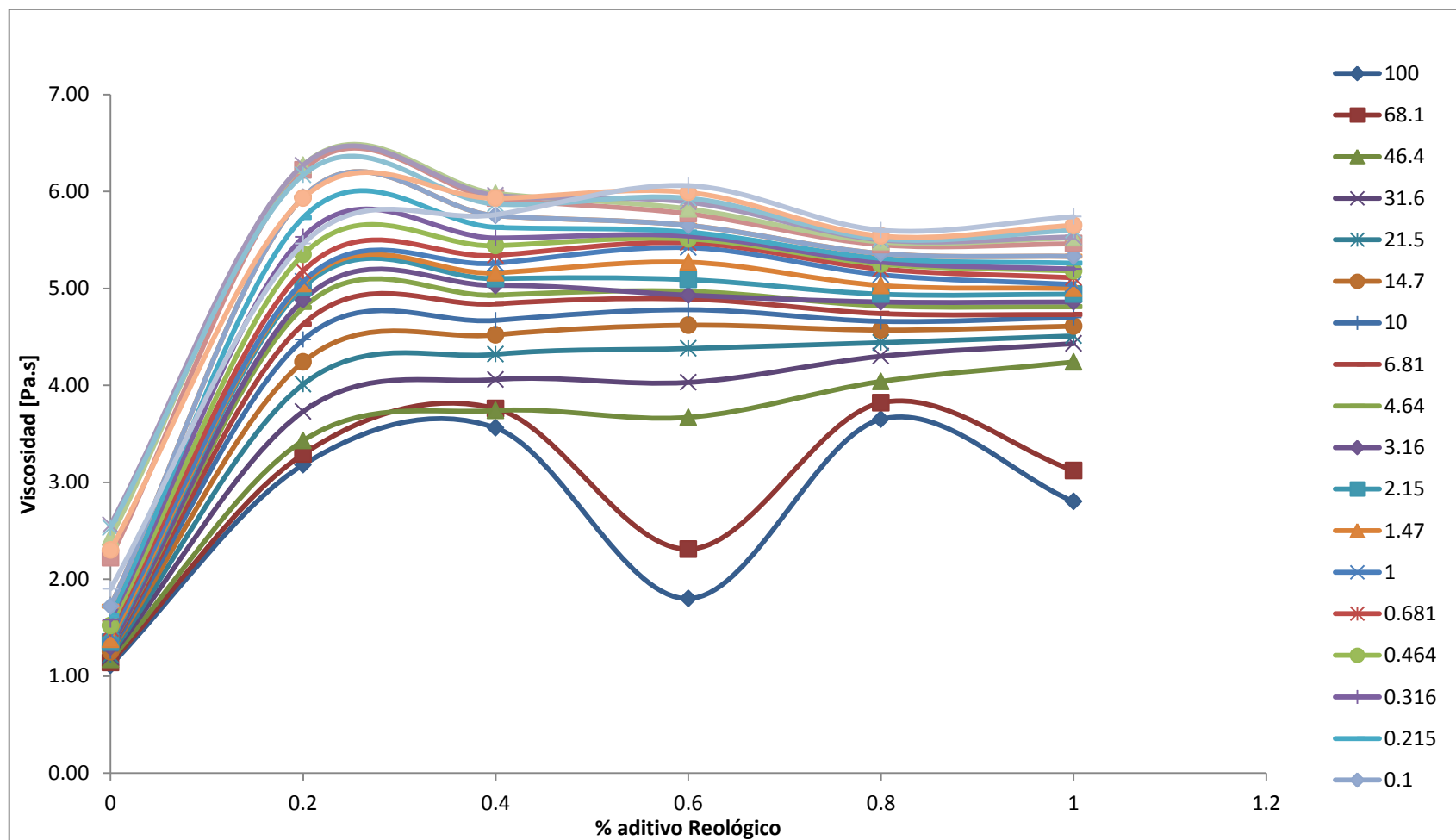


Grafico 27. Curva viscosidad en función de % de aditivo reológico a diferentes gradientes de velocidad para el crudo 1 con 30% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 2 a distintos gradientes de velocidad

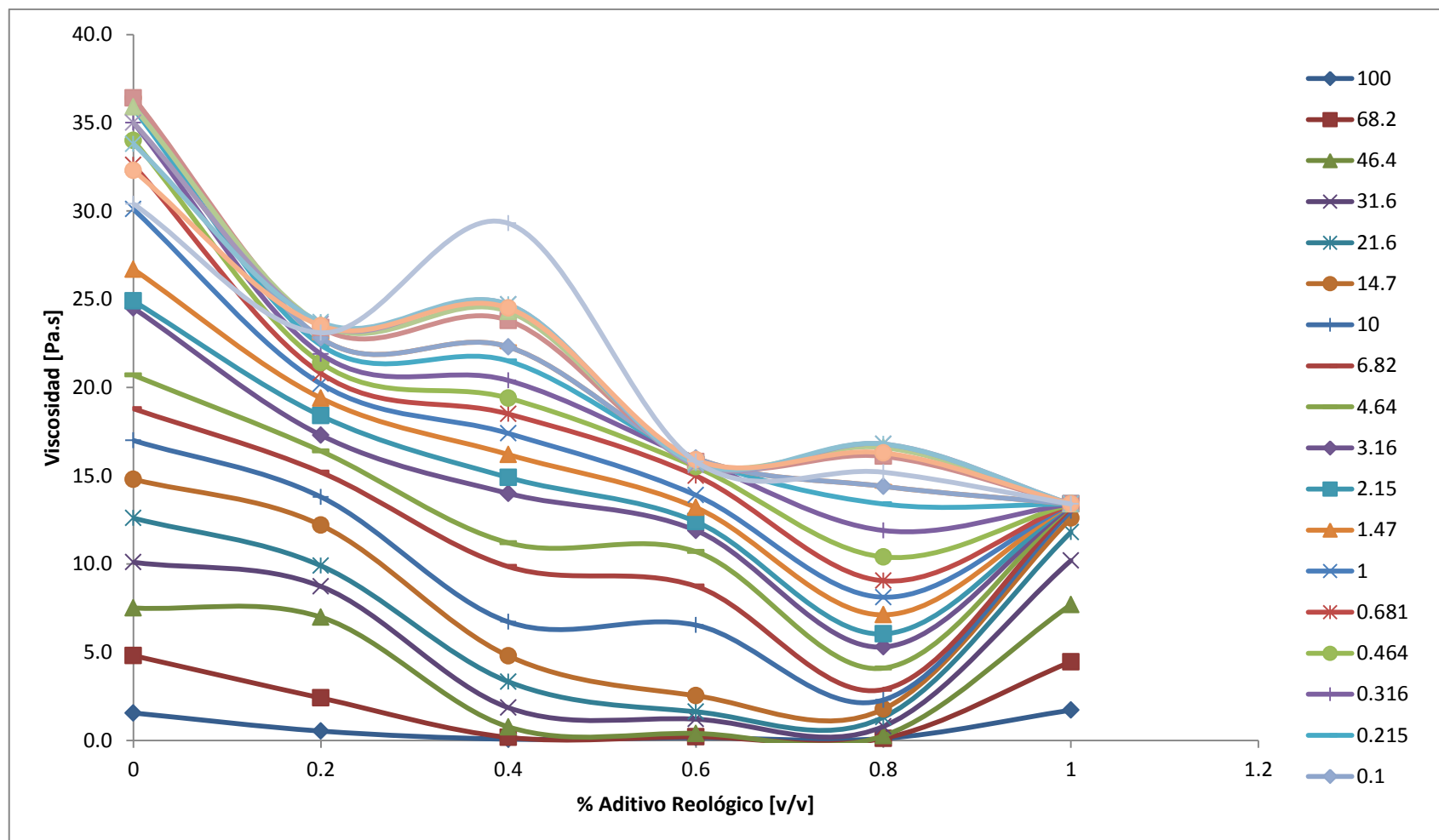


Grafico 28. Curva viscosidad en función de % de aditivo reológico a diferentes gradientes de velocidad para el crudo 2 con 17,5% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 1 a distintos gradientes de velocidad

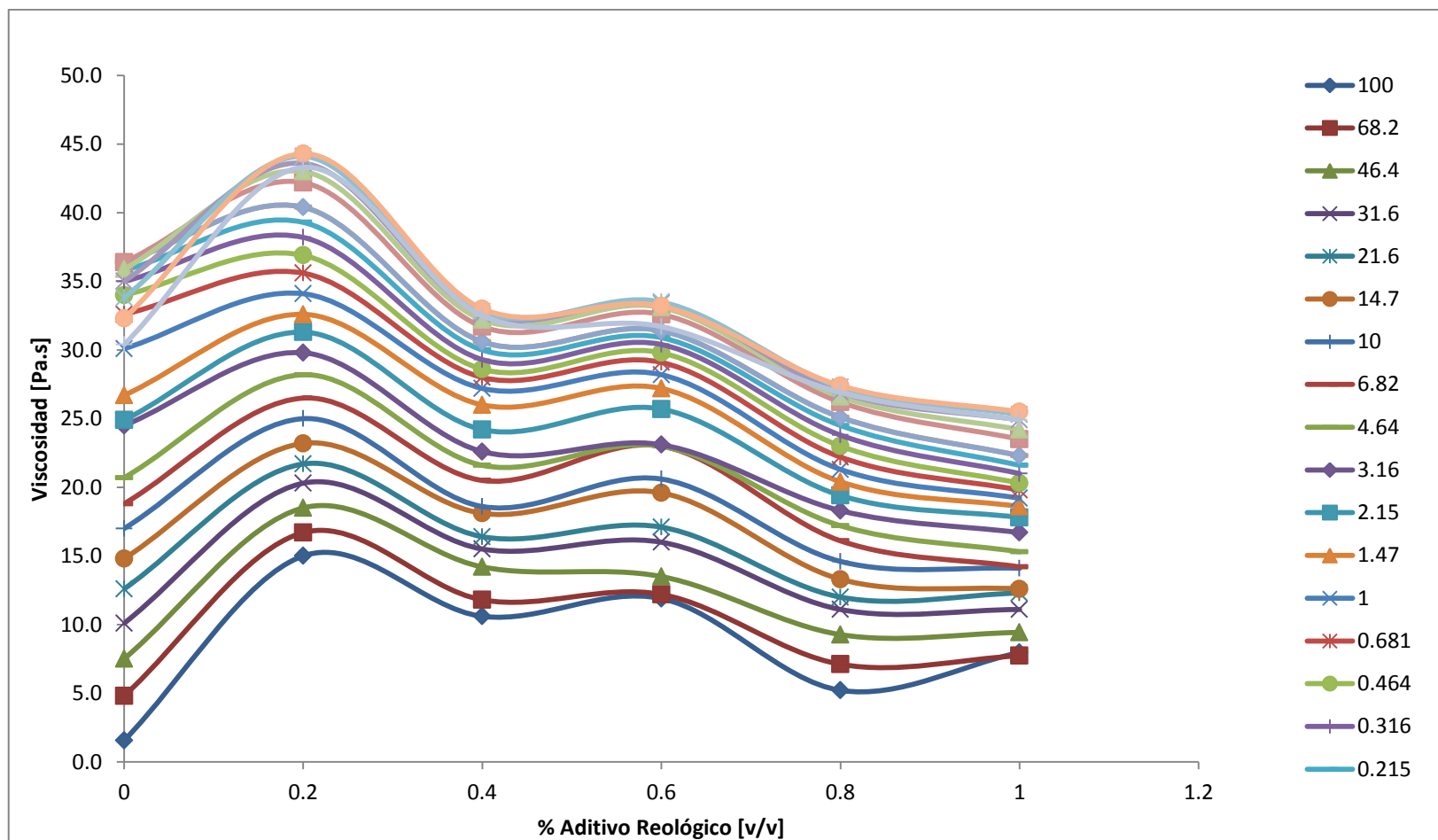


Grafico 29. Curva viscosidad en función de % de aditivo reológico a diferentes gradientes de velocidad para el crudo 2 con 17,5% de agua a 30°C para diferentes concentraciones de agente emulsionante 2 a distintos gradientes de velocidad

Tabla 30. Concentración Óptima de Agente Emulsionante.

A.R.	1	2
Crudo	%	%
1	0,6	0,4
2	0,3	0,2

De los gráficos anteriores se observa que los valores máximos de la curva Viscosidad-% aditivo reológico son los que se indican en la tabla 30

7. DISCUSIÓN

- Para el presente estudio se utilizaron crudos que se clasifican según su grado API como crudos pesados obtenidos de dos campos distintos de producción, uno el petróleo que se manda desde el Bloque 16 al OCP y otro del campo Conaco, con 17,1 y 11,8 API respectivamente y valores de viscosidad cinemática de 4506.2 y 24998.9 cSt.
- El agua utilizada en este estudio es agua tipo 1 con las características que se indican en la tabla 4, en condiciones de campo se debe tomar en cuenta que las características del agua que se utilice podrían afectar a los resultados obtenidos en este trabajo, por ejemplo si se utiliza agua de formación el contenido de NaCl como se puede apreciar en el trabajo de H. Abduraman [2] en donde se aprecia que la tensión superficial tiene una relación inversa con la salinidad y directa con la densidad.
- La concentración de agua utilizada en las emulsiones realizadas se determinó por el cambio de comportamiento reológico en función del porcentaje de agua siendo 30% para el crudo 1 y 17,5% para el crudo 2.
- Considerando que la viscosidad y la densidad no tienen una relación entre ellas, hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos en este estudio son solo aplicables a los crudos utilizados en este y no pueden extenderse los porcentajes de agua y aditivos utilizados para formar las emulsiones a otros petróleos considerando únicamente su densidad API.
- La temperatura a la que se estudió el comportamiento de las emulsiones es de 30°C, se escogió esta temperatura considerando que es la temperatura ambiente en la región amazónica, hay que tener en cuenta que a la presión a la que se realizó el ensayo y temperaturas menores de 35°C [24] las parafinas cristalizan.
- El comportamiento de los crudos pesados en este estudio guardan relación con el trabajo de S. Sánchez. Que determino que los crudos pesados se comportan como materiales Pseudo-plásticos y plásticos y se describen con modelos de Phillips-Deustch y Ostwald.

- Se observa que de las emulsiones formadas, las elaboradas con el aditivo 2 con los dos crudos son las que menos cantidad de aditivo reológico necesitan.
- De la observación de las gráficas de viscosidad en función del gradiente de velocidad se observa que la emulsión formada con el crudo dos con el 17,5% del aditivo 1, se observa que a gradientes de velocidad comprendidas entre de $0,1\text{s}^{-1}$ y 1s^{-1} la viscosidad disminuye directamente proporcional al porcentaje de aditivo reológico.

8. CONCLUSIONES

- La viscosidad de las emulsiones estudiadas son considerablemente menores a las de las muestras de crudo comparándolas a la misma temperatura , como se puede apreciar en la tabla 23 y tienen un comportamiento Pseudo-plasticos al igual que el crudo sin formar emulsiones, correspondiéndose dicho comportamiento a tres modelos tres modelos reologicos Carreau, Phillips-Deustch y Ostwald.
- Se observa que las viscosidades de las emulsiones formadas con el aditivo dos, tienden a ser considerablemente mayores que las viscosidades que se obtiene de las emulsiones con el aditivo 1, como se puede observar al comparar las tablas 26 y 27 para el crudo 1, 28-29 para el crudo 2.
- Para el crudo uno el agua tiene un efecto significativo en la reducción de la viscosidad de la emulsión a partir del 25% en volumen de agua (tabla 15), y a partir del 30% existe un cambio en el modelo reológico de la emulsión (tabla 24), para las emulsiones del crudo dos el cambio de modelo reológico se da con 17,5% en volumen de agua (tabla 20 y 25)
- En las emulsiones formadas con el Aditivo 1 se observa que existe una reducción significativa entre la viscosidad y el gradiente de velocidad, a diferencia de las emulsiones que se formaron con el aditivo 2 en donde el decremento de la viscosidad con el aumento del gradiente de velocidad es mínimo.
- Entre los dos aditivos ensayados se comprueba que el aditivo 2 trabaja a menores concentraciones a temperatura constante y forma emulsiones de mayor estabilidad.
- El porcentaje de agua para formar las emulsiones de crudo con el crudo del bloque 16 es mayor que en que se determinó para el crudo del campo Conaco, al tratarse de un crudo que paso por un proceso de deshidratación, el contenido de químico clarificador residual hace que se necesite mayor cantidad de agua para que se forme la emulsión, de igual manera estas emulsiones tienen un menor tiempo de estabilidad.

9. RECOMENDACIONES.

- Hacer un estudio de cómo se afecta el comportamiento reológico de las emulsiones con el contenido de asfáltenos en el crudo, y como su presencia afecta en el porcentaje de agua en el que se produce el cambio de comportamiento reológico y la concentración optima de Aditivo reológico.
- Realizar un estudio de la variación del tamaño de gota de la emulsión a lo largo de la desestabilización de esta, se puede realizar con equipos destinados para este fin.
- Realizar un estudio en la que se tenga en cuenta la variación de la tensión superficial de las emulsiones con cada agente emulsionante utilizado y determinar cual tiene un mayor impacto en la energía superficial de la emulsión.
- Hacer un estudio de como el contenido residual de químicos inyectados en la cabeza de los pozos puede afectar el comportamiento reológico de las emulsiones de crudo/agua.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RODRÍGUEZ, P. Héctor; MELEK, Sofía; HERNÁNDEZ, José Falcón. Efecto de la relación petróleo agua emulgente en el comportamiento reológico y en la estabilidad de las emulsiones acuosas directas del petróleo crudo cubano utilizando el emulgente, la Habana : Tecnología Química, 2010, Vol. Xxx. p.68
2. ABDURAHMAN, H. Stability of Water in Crude Oil Emulsion: Effect of the Cocamide Diethanolamide (DEA) and Span 83. Malasia : Facultad de Ingeniería Química y de Recursos Naturales de la Universidad Malasia Pahang, 2012. p.5.
3. KHAN, M. Rashid. Rheological Properties of Heavy Oils and Heavy Oil Emulsions.. 4, s.l. : Energy Source, 2007, Vol. 18. 00908319608908777. p.2.
4. CALLE, Luis. Química y Características del Petróleo y Productos Básicos. Quito : s.n., 2004. p.137
5. GONZALES, G. J. Explotación de Crudos Pesados. Bogotá : Boletín Técnico ARPEL, 1980, Vol. 3 , p.5.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for API Gravity for Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method). [ed.] ASTM. American National Standard. 1995, p.4.
7. LLUCH ÚRPI, José. Tecnología y Margen del Refino del Petróleo. Madrid : Diaz Santos S.A., 2008. ISBN 978-84-7978-875-9, p.464.
8. CURTIS, Carl, KOPPER, Robert y, et al. YACIMIENTOS DE PETRÓLEO PESADO. [ed.] Slumberger. s.l. : slb, 2003, Oilfield Review, pp.32-55.
9. NEHRING, R. HESS, R., y KAMIONSKI, M. THE HEAVY OIL RESOURCES OF THE UNITED STATES. [en línea] RAND Corporation, 1983.[Fecha de consulta : 20 de Diciembre de 2013]. Disponible en <<http://www.rand.org/pubs/reports/R2946.html>>.
10. DOUMIER, Olivier. Les Emulsion, Biologique Technique. Paris : Scérém CNDP-CRDP, 2011, p.10
11. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. s.l. : IUPAC, 2012. Vol. Version 2.3.2 pdf, p.499
12. CALLE, Luis. Química y Características del Petróleo y Productos Básicos. Quito : s.n., 2004, p. 137

13. SCHUKIN, E. D., PERTSOV, A. V. y AMÉLINA, E. A. Química Coloidal. [trad.] K. STEINBERG. primera en español. Moscú : MIR, 1988.. ISBN: 5-03-0000608-7, pp. 336-383.
14. ALVAREZ-Lugo1, Alex E. Determinación de la energía superficial libre de cementos. [ed.] REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN. 2, s.l. : REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL., AGOSTO de 2009, Vol. 29, pp. 20-24.
15. BALLINGER, Jack T. y SHUGAR, Gershon J. Chemical Technicians' Ready Reference Handbook. Fifth Edition. New York : McGraw-Hill Professional, 2011. ISBN: 9780071745925, p.13.
16. BIRD, R. B., STEWART, W. E. y LIGHTFOOT, E. N. Fenómenos de Transporte. Barcelona : Editorial Reverte S.A., 1992. ISBN: 84-291-7050-2, p.11.
17. SCHUKIN, E. D., PERTSOV, A. V. y AMÉLINA, E. A. Química Coloidal. [trad.] K. STEINBERG. primera en español. Moscú : MIR, 1988. pág. 383. ISBN: 5-03-0000608-7, p.340
18. BIRD, R. B., STEWART, W. E. y LIGHTFOOT, E. N. Fenómenos de Transporte. Barcelona : Editorial Reverte S.A., 1992. ISBN: 84-291-7050-2, p.11.
19. CÁRDENAS S. Modelos Predictivos de Viscosidad para Crudos y Fracciones de Crudos. Quito : Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, 1995. Trabajo de Grado, p.19.
20. FORNEY, P. ENWERE, C. DAVILA, M. GALLARAGA and CARRERA O. Campo Libertador, Cuenca Oriente, Ecuador; Existen Más Reservas Por Recuperar?, [ed.] ACGGP. s.l. : ACGGP, 2003. [en línea] 8th Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas. [fecha de consulta: 15 de Diciembre de 2013]. Disponible en <<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/publication=7953>>.
23. TEMA 5, Técnicas reométricas [en línea] universidad de Alicante, 2001 [Fecha de consulta: 3 de Julio de 2013]. Disponible en <<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>>.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, ASTM D-96. Standard Test Method for water and sediments in Crude Oil by Centrifuge method. 1997.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, ASTM D-5002. Standard Test Method for Density and Relative Density in Crude Oil by Digital Density Analyzer. *American Society*. 1997.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, ASTM D-445. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids. *American Nacional Society*. 1997.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, ASTM D-4294. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. *American Nacional Test*. 1998.

DEALY John, Official nomenclature for material functions describing the response of a viscoelastic fluid to various shearing and extensional deformations, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal-Canada, 1992.

GUAZZELLI Élisabeth, Rhéologie des fluides complexes [en línea] Poly Tech Marseille, 2001 [Fecha de consulta: 3 de Julio de 2013]. Disponible en < <http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/~guazzelli/publiperso/Rheo.pdf>>.

HOLMBERG Krister, et al., Handbook of applied surface and colloid chemistry, editorial Willey & Sonc Inc, 2002, ISBN: ISBN 0-471-49083-0.

MYERS Drew, Surfaces, interfaces and colloids, editorial Willey & Sonc Inc., 1999, ISBN: 0-471-33060-4.

ROJAS G. Orlando, CUADERNO FIRP-S520B Introducción a la reología [en línea] Mérida: Universidad de los Andes, Versión 2, 1999, [Fecha de consulta: 27 de Enero de 2014]. Disponible en < <http://www.firp.ula.ve/site/es/cuadernos-firp-gratuitos>>.

SALAGER Jean Luis, CUADERNO FIRP-S201A Surfactantes en solución acuosa [en línea]
Mérida: Universidad de los Andes, Versión 2, 1993, [Fecha de consulta: 12 de Diciembre de
2013]. Disponible en < <http://www.firp.ula.ve/site/es/cuadernos-firp-gratuitos>>.

ANEXOS

ANEXO A.

Reómetro PHYSICA MCR-301.



ANEXO B.

Equipo de determinación de densidad API, norma ASTM D-5002.



ANEXO C.

Reogramas de las emulsiones preparadas con los distintos aditivos.

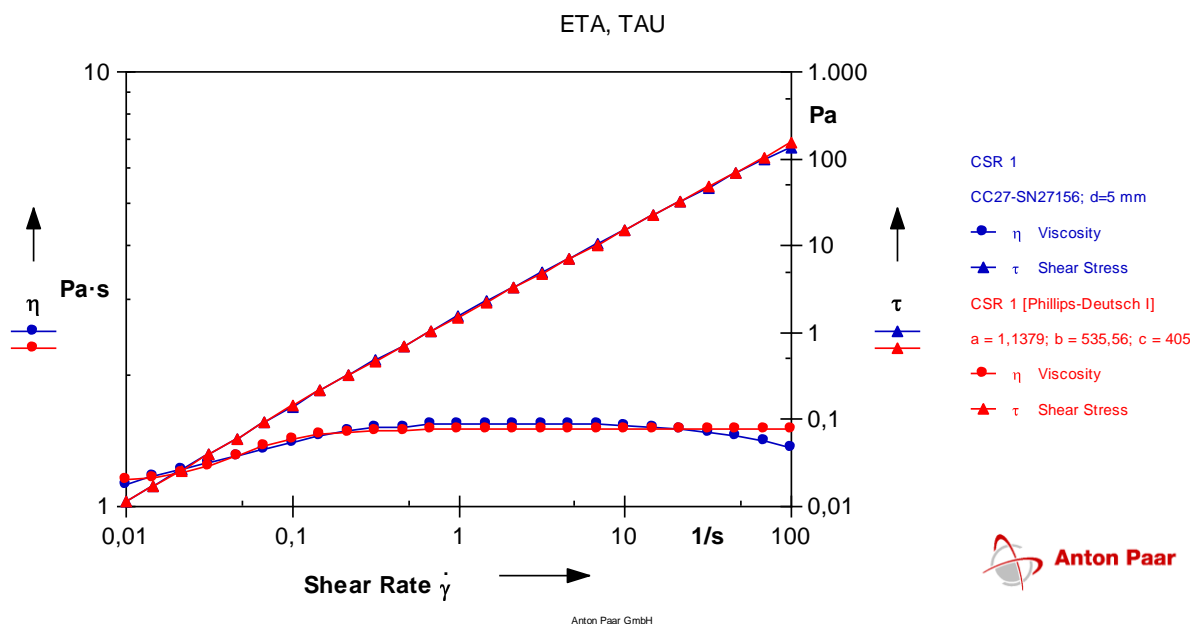


Figura C.1. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,2% de agente emulsionante 1.

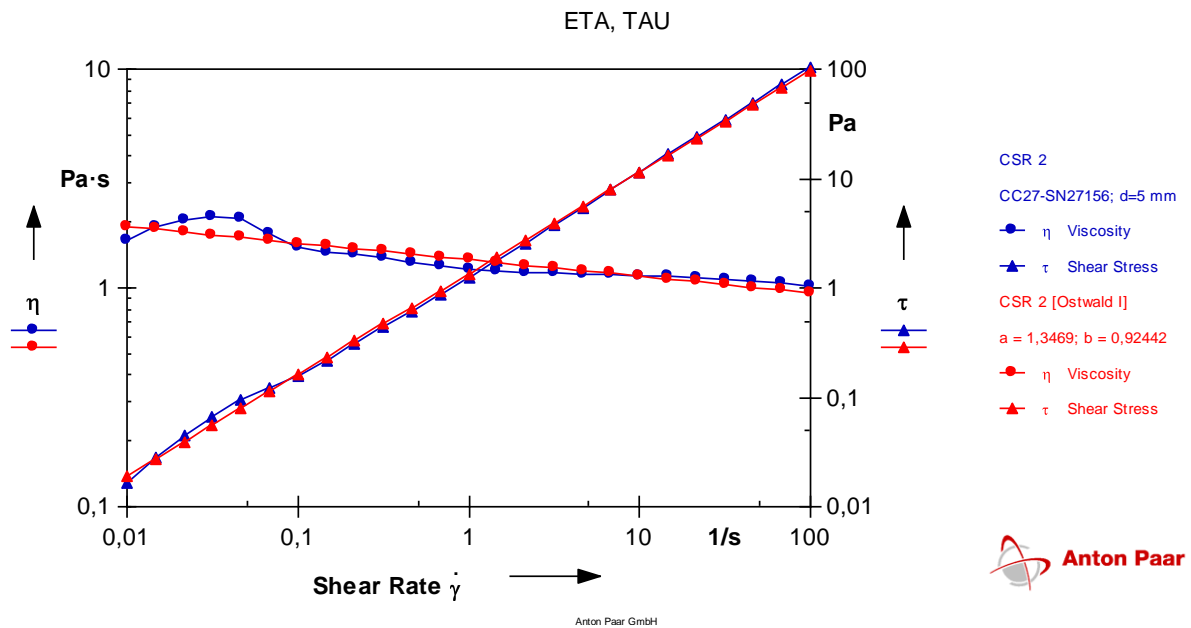


Figura C.2. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,4% de agente emulsionante 1.

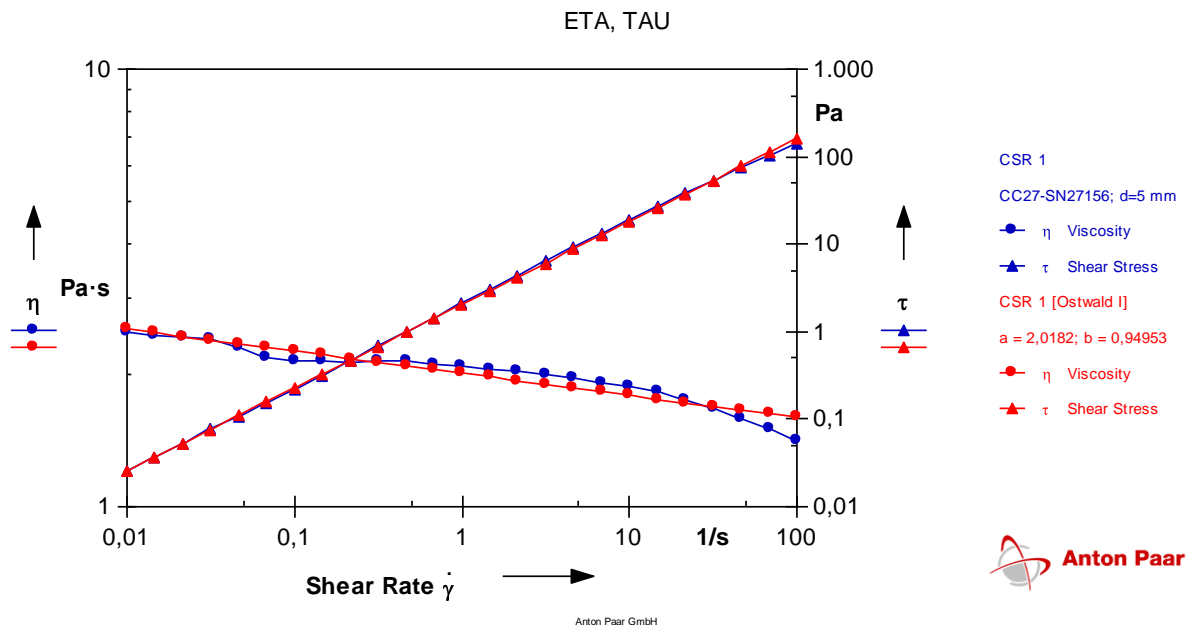


Figura C.3. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,6% de agente emulsionante 1.

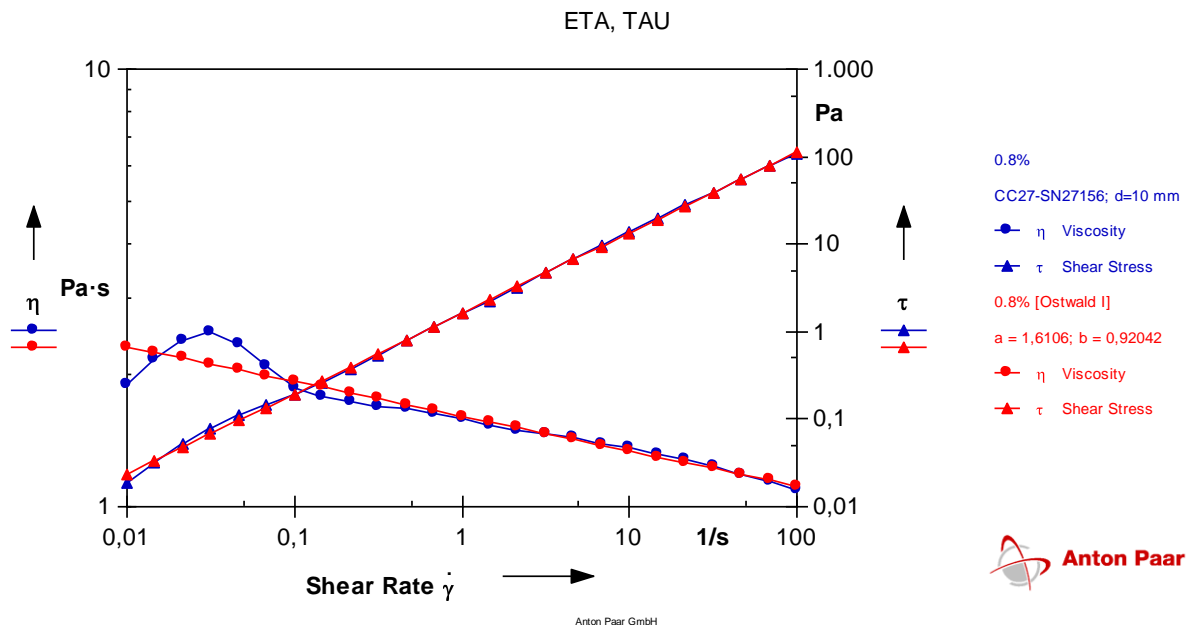


Figura C.4. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,8% de agente emulsionante 1.

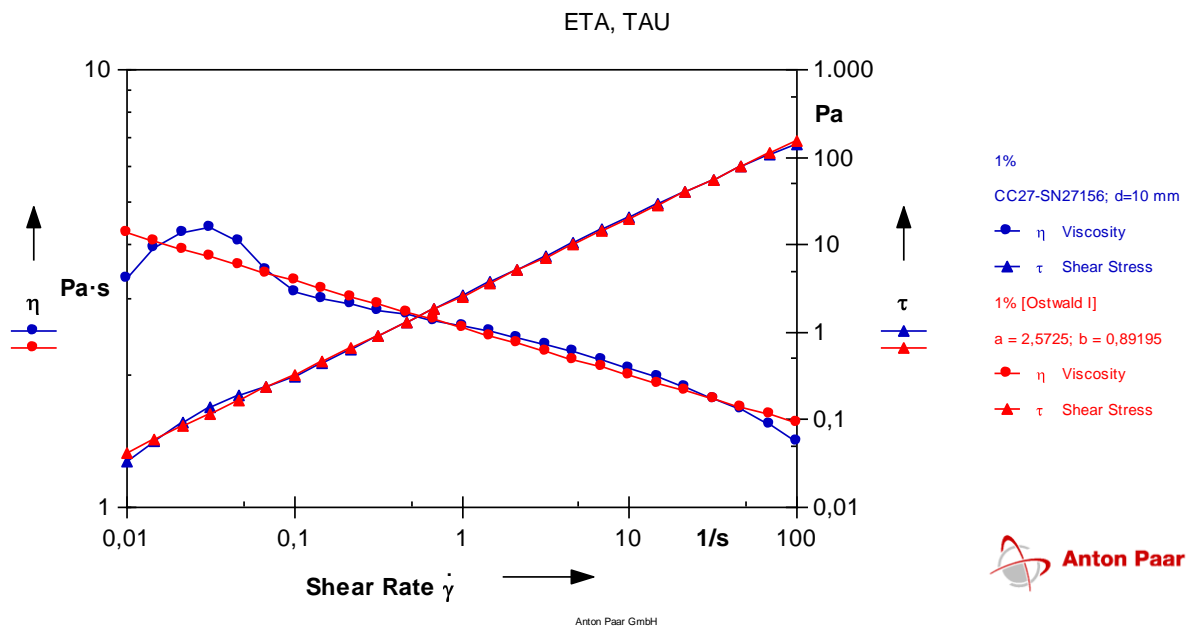


Figura C.5. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 1% de agente emulsionante 1.

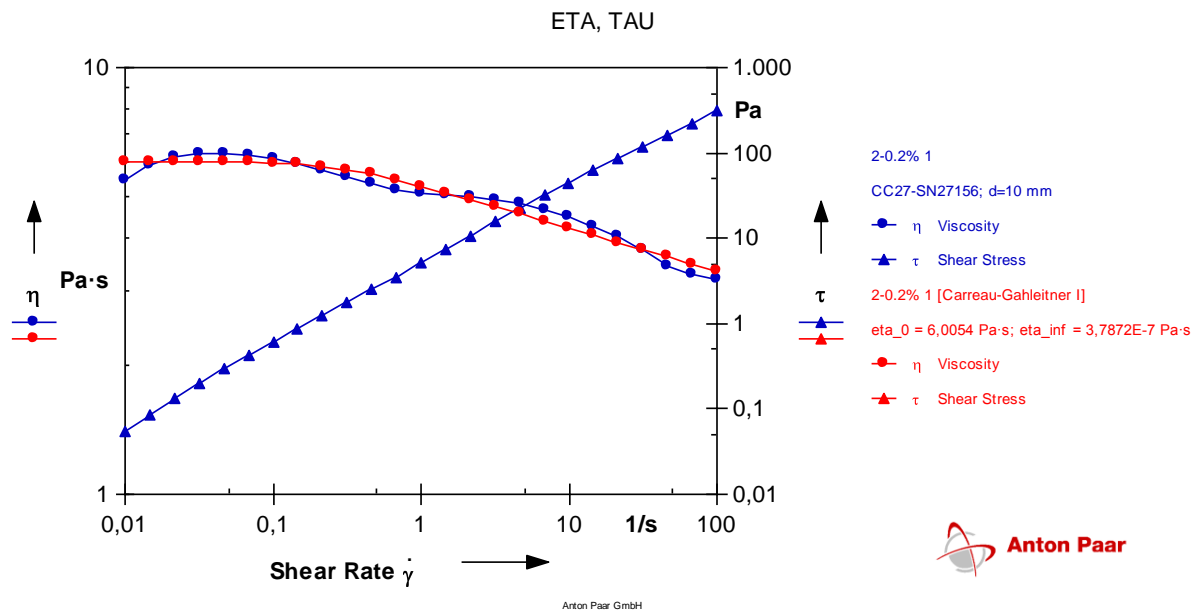


Figura C.6. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,2% de agente emulsionante 2.

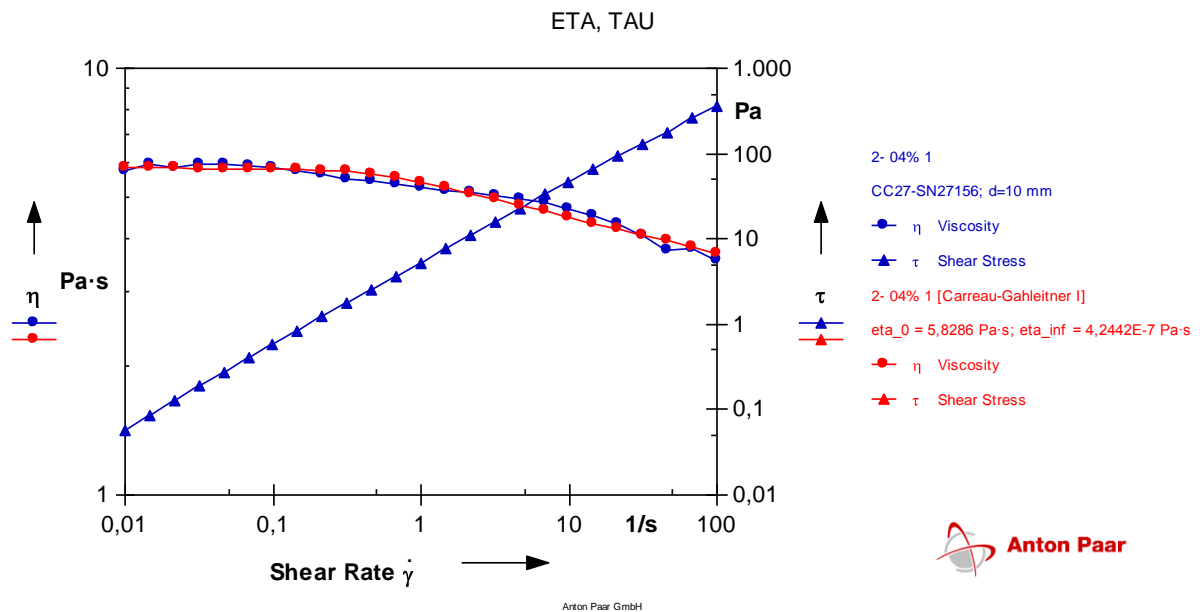


Figura C.7. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,4% de agente emulsionante 2.

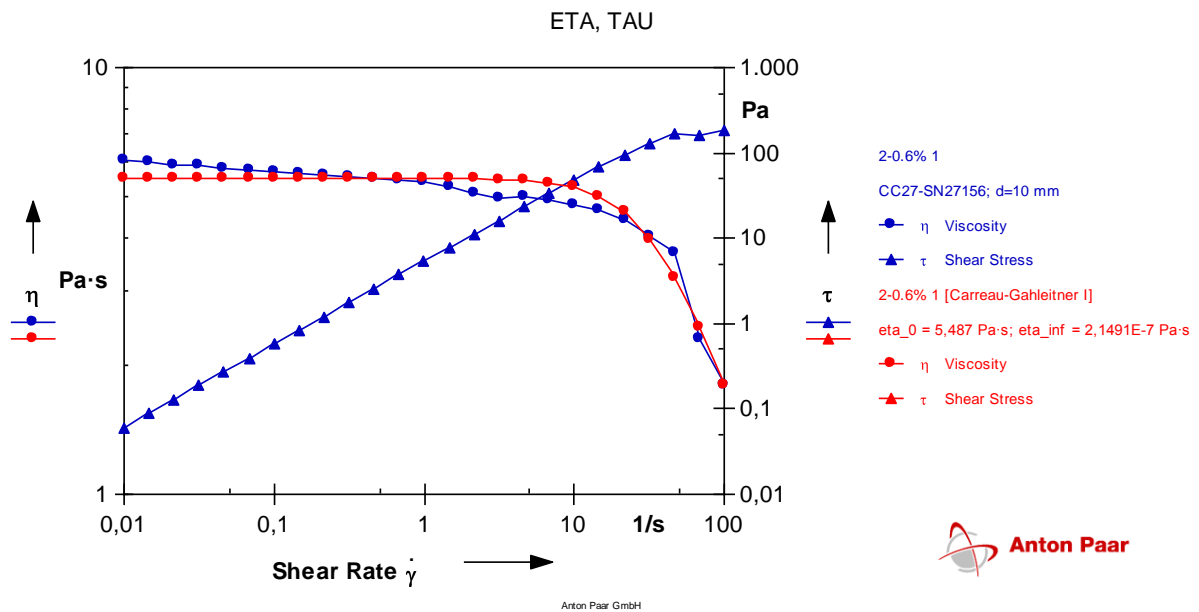


Figura C.8. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,6% de agente emulsionante 2.

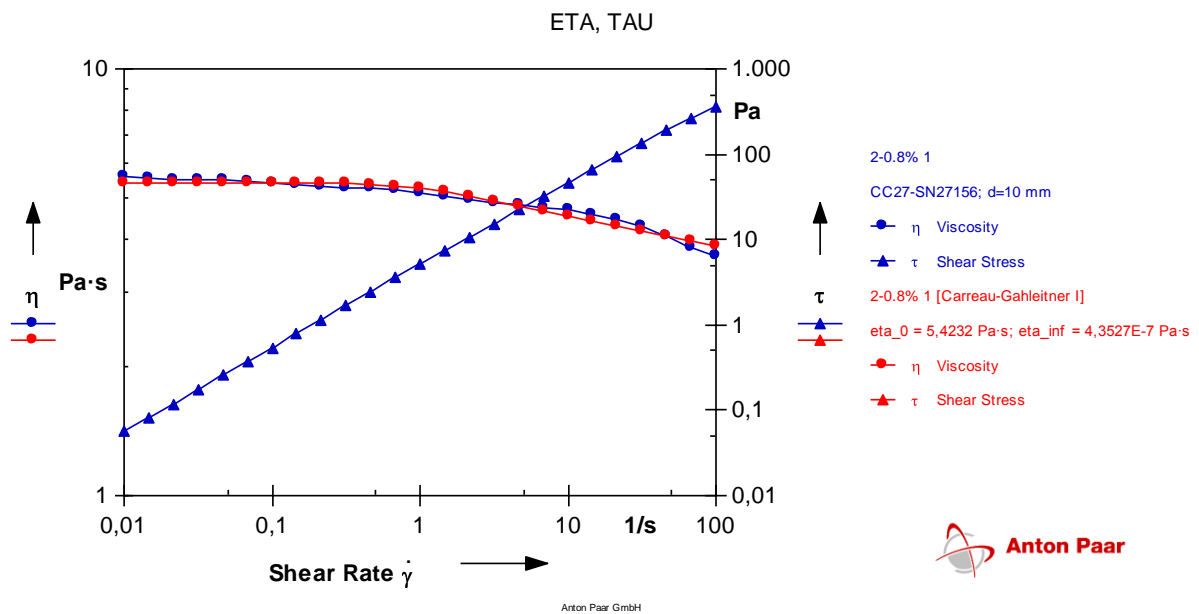


Figura C.9. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 0,8% de agente emulsionante 2.

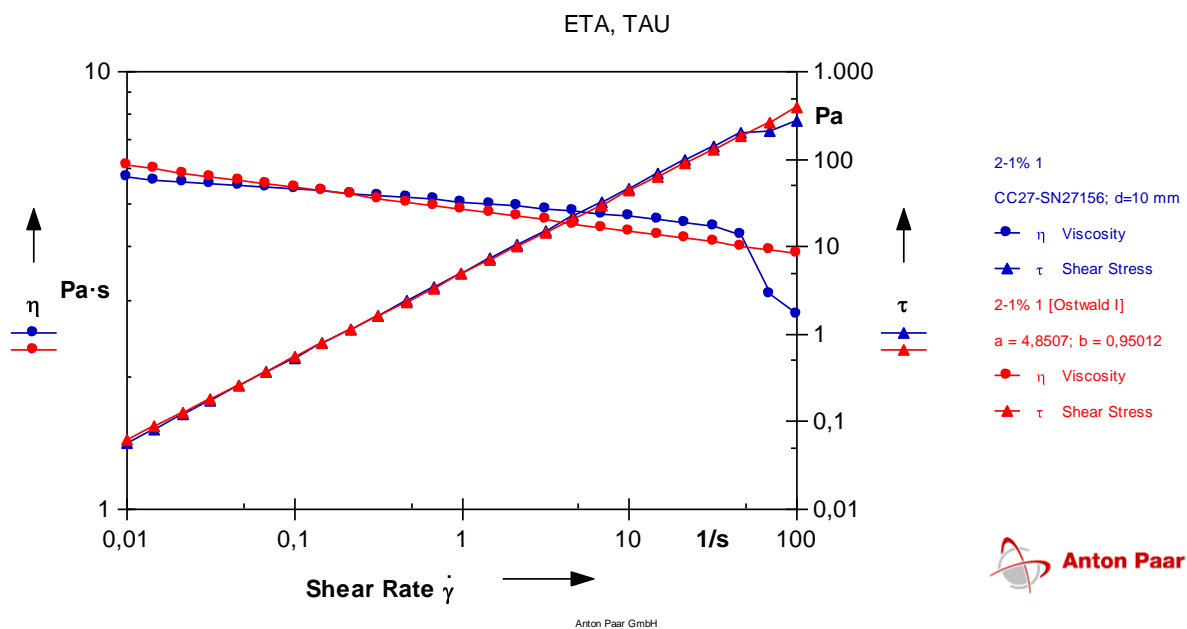


Figura C.10. Reograma emulsión formada con crudo 1, 30% de agua y 1% de agente emulsionante 2.

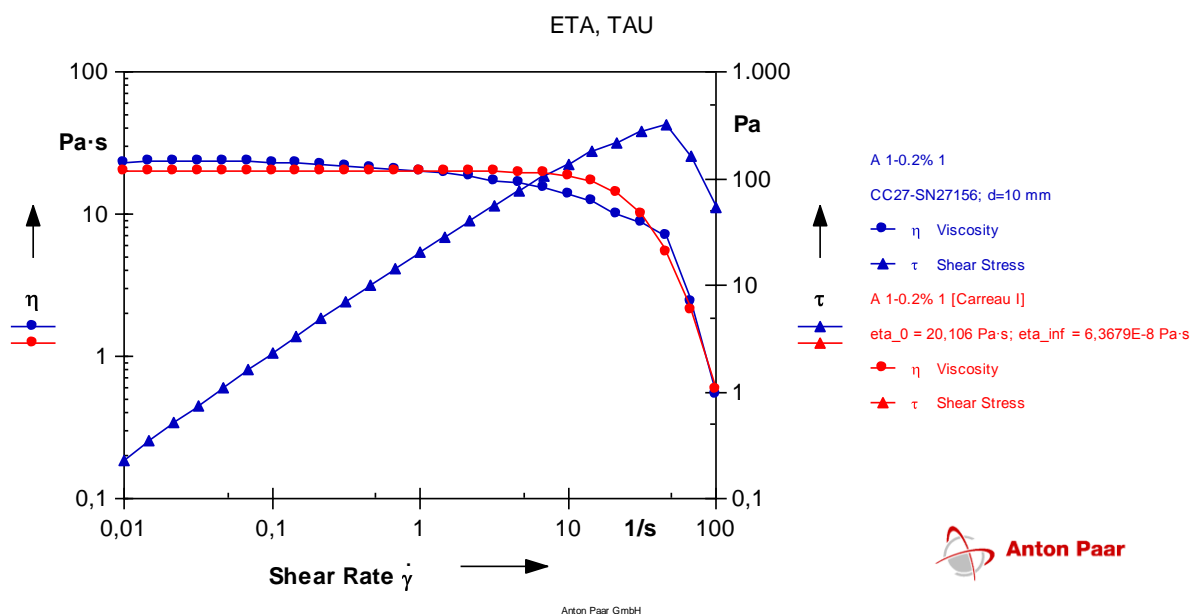


Figura C.11. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,2% de agente emulsionante 1.

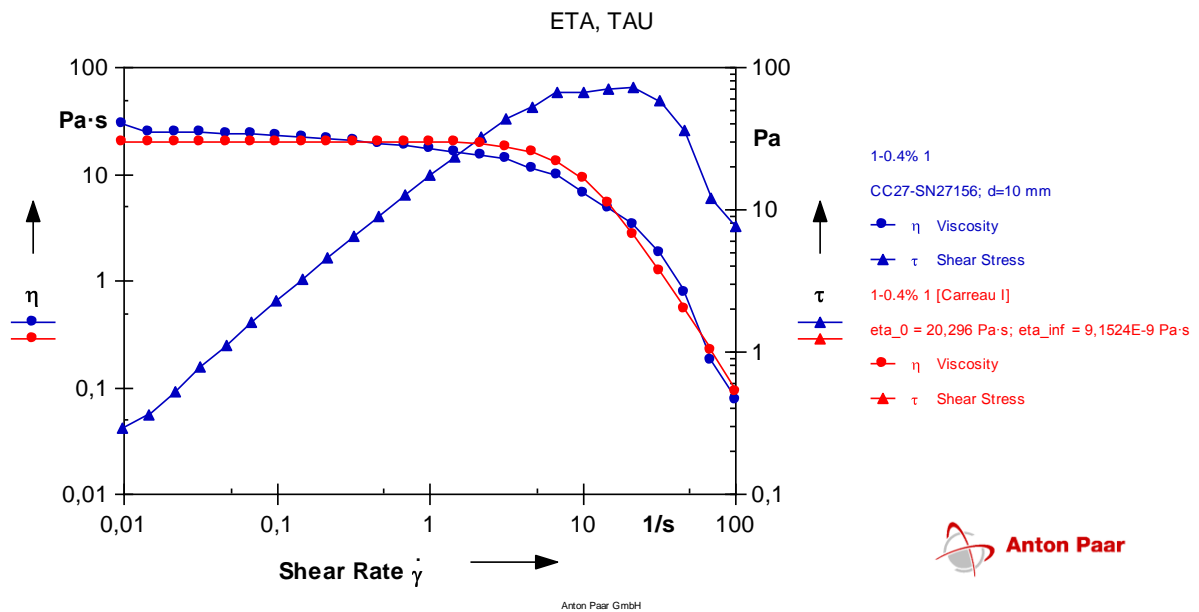


Figura C.12. Reograma emulsión formada con crudo 1, 17,5% de agua y 0,4% de agente emulsionante 1.

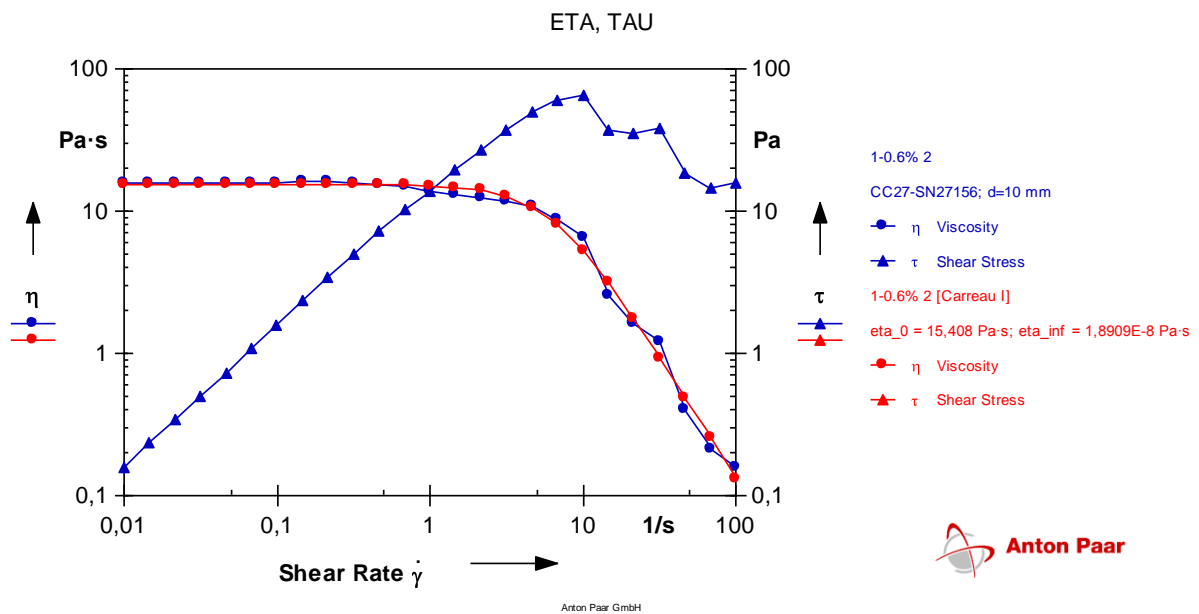


Figura C.13. Reograma emulsión formada con crudo 1, 17,5% de agua y 0,6% de agente emulsionante 1.

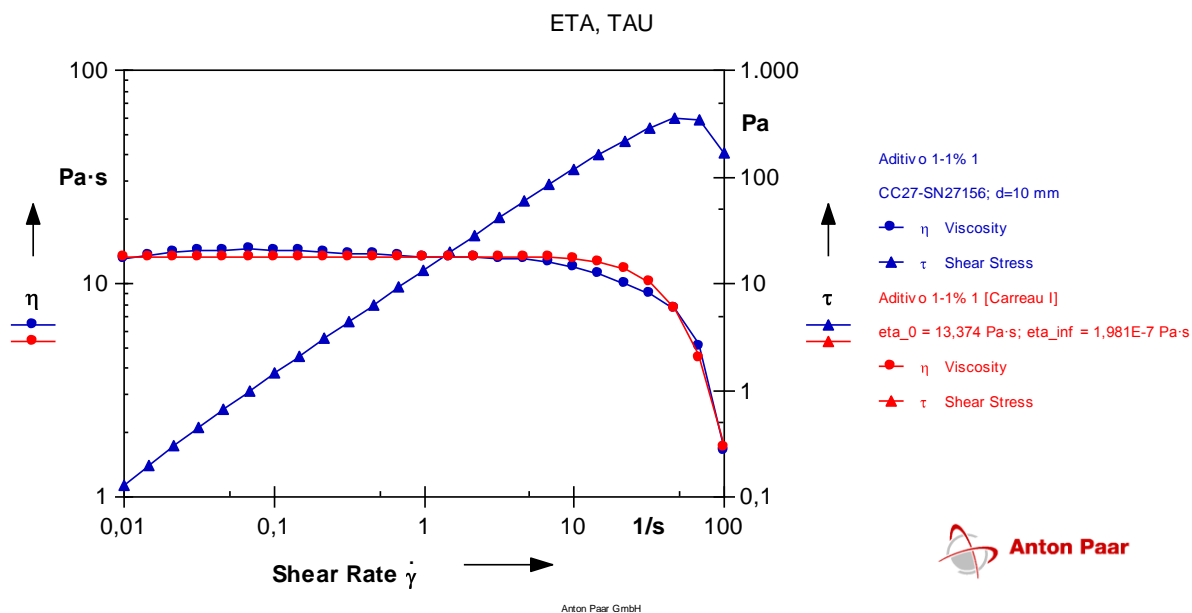


Figura C.14. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 1% de agente emulsionante 1.

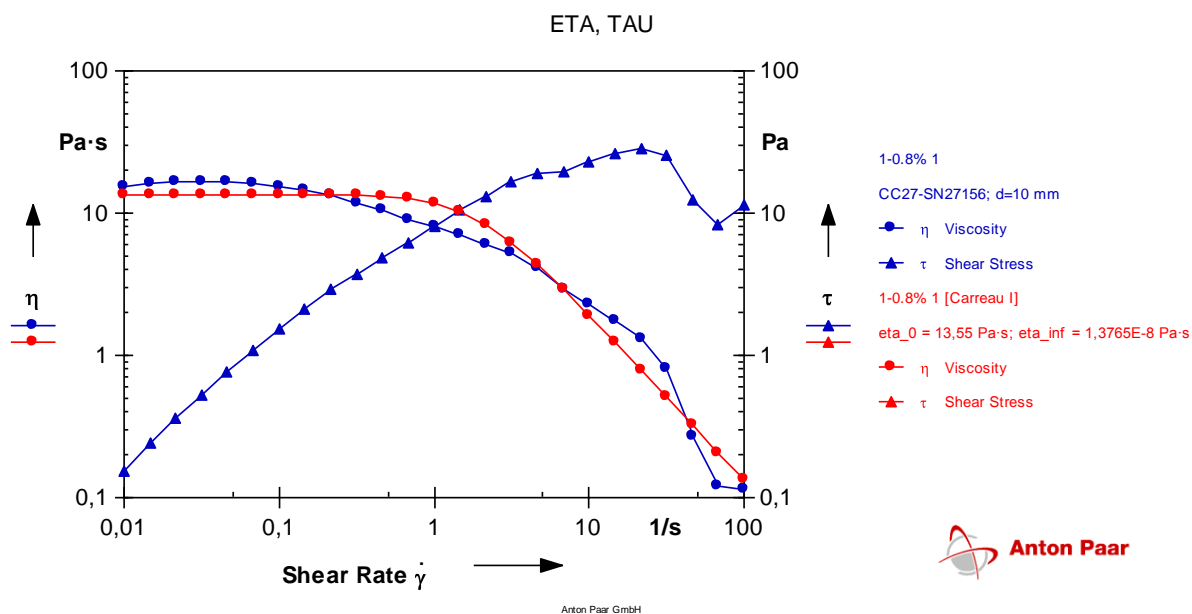


Figura C.15. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,8% de agente emulsionante 1.

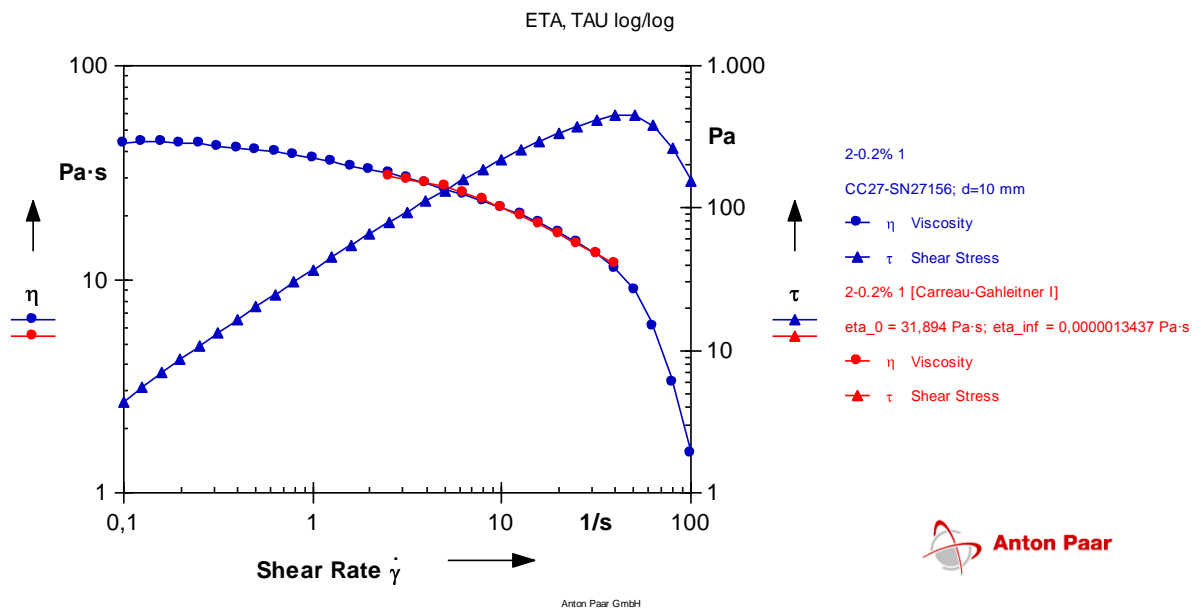


Figura C.16. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,2% de agente emulsionante 2.

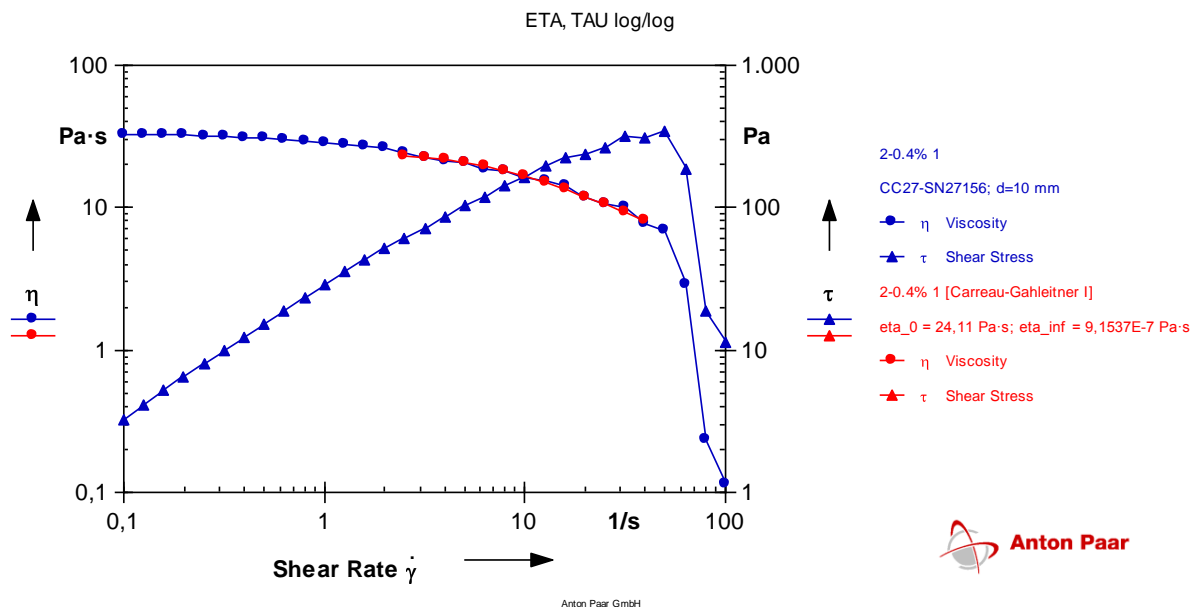


Figura C.17. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,4% de agente emulsionante 2.

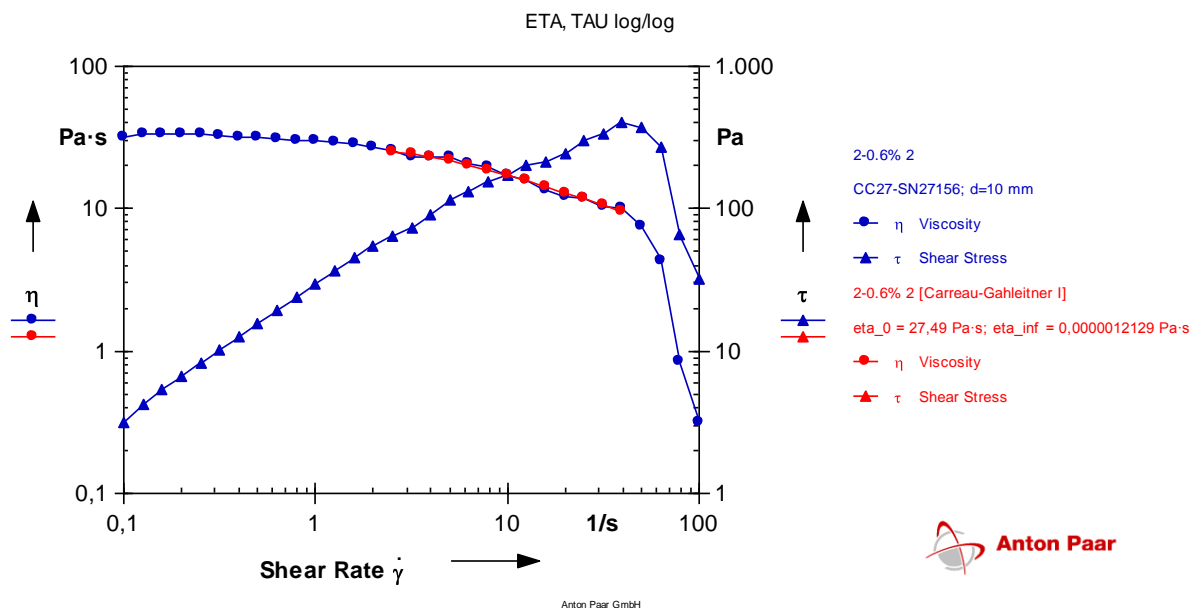


Figura C.18. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,6% de agente emulsionante 2.

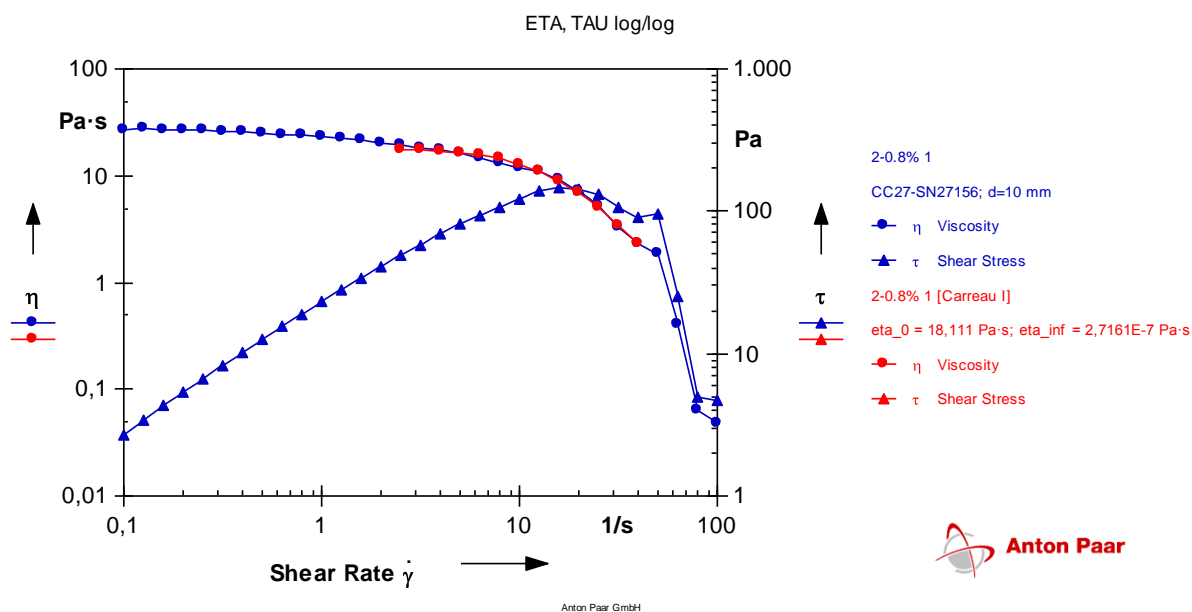


Figura C.19. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 0,8% de agente emulsionante 2.

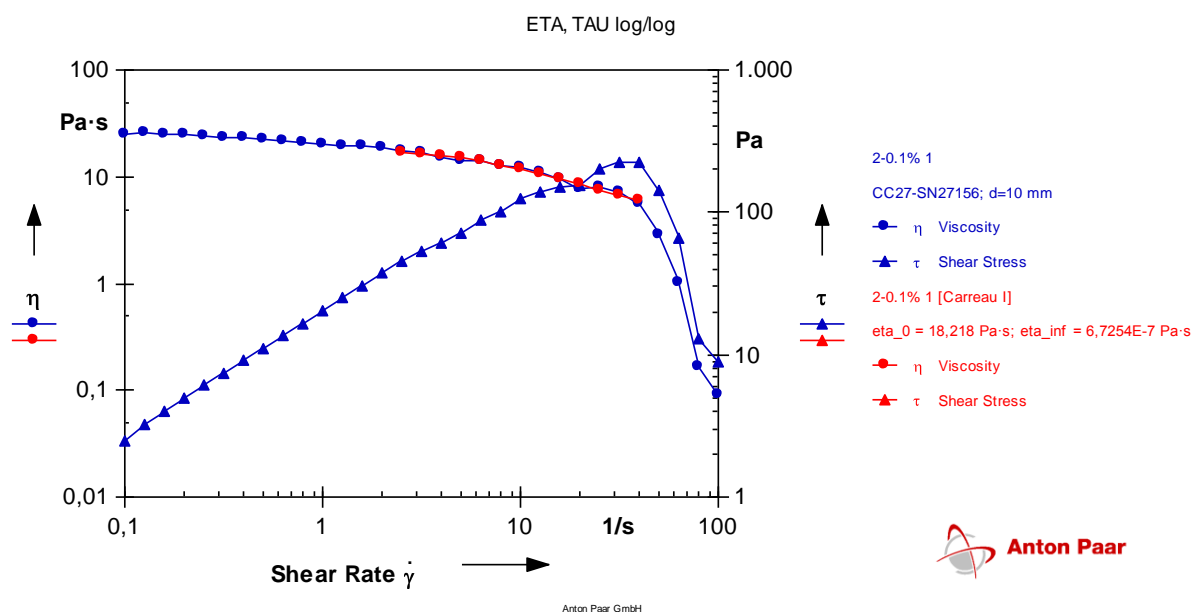


Figura C.20. Reograma emulsión formada con crudo 2, 17,5% de agua y 1% de agente emulsionante 2.